

На правах рукописи



ГАЗИЗОВА ОЛЬГА ВИКТОРОВНА

**ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ МНОГОМАШИННЫХ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ВНУТРИЗАВОДСКОГО
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО
ПРЕДПРИЯТИЯ**

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Магнитогорск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Научный консультант доктор технических наук, профессор
Корнилов Геннадий Петрович

Официальные оппоненты: **Илюшин Павел Владимирович**, доктор технических наук, ФГБУН "Институт энергетических исследований Российской академии наук", руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределённой энергетики

Куликов Александр Леонидович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника», г. Нижний Новгород

Паздерин Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», заведующий кафедрой «Автоматизированные электрические системы», г. Екатеринбург

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

Защита состоится **« 16 » апреля 2026** года в **15 ч. 00** мин. в конференц-зале (ауд. 231-233) на заседании диссертационного совета 24.2.324.05 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, просп. Ленина, 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова на сайте организации: www.magtu.ru.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета 24.2.324.05
канд. техн. наук, доцент

Константин Эдуардович Одинцов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из основных мировых тенденций развития энергетики в наши дни является использование объектов распределенной генерации. С одной стороны, с целью декарбонизации и снижения влияния на окружающую среду активно внедряются возобновляемые источники энергии, зависящие от природных условий, с другой - происходит увеличение числа местных электростанций, работающих на природном газе и вторичных энергосурсах, позволяющих снизить себестоимость электрической и тепловой энергии. Данные тенденции характерны и для отечественной энергетики. На крупных промышленных предприятиях внедряются газопоршневые (ГПЭС), газотурбинные (ГТЭС) и парогазовые установки для снижения себестоимости продукции за счет уменьшения затрат на электрическую и тепловую энергию.

Расширение объектов распределенной генерации в условиях крупной заводской электростанции (ЗЭС) приводит к усложнению структуры внутриводского электроснабжения (ВЗЭС), эксплуатационных и аварийных режимов работы и повышению требований к их управлению. Исторически сложилось, что на отечественных металлургических предприятиях в качестве источников тепловой и электрической энергии выступают заводские теплоэлектроцентрали, имеющие в своем составе блоки паровая турбина - синхронный генератор установленной мощностью до 60 МВт. Использование малоинерционных ГПЭС и ГТЭС ограничивается их чувствительностью к провалам напряжения при параллельной работе с энергосистемой (ЭС) и сбросам мощности при выходе на раздельную работу в условиях разветвленной сети с энергоемкой резкопеременной нагрузкой. Помимо роста числа источников и их установленных мощностей на этапе реконструкции происходит изменение самой структуры существующих ЗЭС, в частности, переход от поперечных связей по электроэнергии к блочным схемам. С учетом энергоемких высоковольтных двигателей, питающихся с шин генераторного напряжения, получаем разветвленную многомашинную электротехническую систему ВЗЭС. В таких условиях возможны провалы напряжения и не исключен выход электростанции в островной режим с тепловой и электрической нагрузкой. Основной задачей в подобных ситуациях остается сохранение статической и динамической устойчивости генераторов ЗЭС, что требует совершенствования принципов управления электрическими и тепловыми режимами. При реконструкции и расширении ЗЭС должны быть учтены особенности потребителей электроэнергии металлургического производства - высокая надежность электроснабжения, значительная установленная мощность отдельных электроприемников, соизмеримая с установленной мощностью источников, наличие специфических нагрузок.

Анализ существующих показателей статической устойчивости синхронных генераторов выявил, что они не соответствуют требованиям нормативных документов. При совместной работе с ЭС к этому приводит сочетание высокой загрузки генераторов ЗЭС по плану выработки электроэнергии, несовершенство систем регулирования возбуждения и повышенного напряжения со стороны ЭС. Примерно раз в три года ЗЭС выходят в островной режим в результате срабатывания дифференциальной защиты шин связи с ЭС. Частой причиной неуспешных выходов на раздельную работу является некорректное распределение функций блоков

паровая турбина - синхронный генератор по обеспечению тепловой и электрической нагрузки без учета работы дифференциальной защиты шин, баланса мощностей и статической устойчивости. Простой блоков турбина - генератор делятся до трех суток, а цехов, питающихся с шин генераторного напряжения, - до суток, что с потерей тепловой нагрузки определяет существенный экономический ущерб.

Существующие нормы показателей устойчивости ЭС ориентированы на управление режимами при централизованном электроснабжении. Децентрализация производства электроэнергии требует индивидуального подхода к объектам и совершенствования принципов управления ЗЭС с учетом структуры сети, условий связи с ЭС, объемов электрической и тепловой нагрузки.

Актуальность указанных проблем однозначно подтверждается эксплуатационными показателями режимов выбранных в качестве объекта исследования промышленных тепловых электростанций (ТЭС): центральной (ЦЭС) и паровоздухоудувной (ПВЭС-2) ПАО Магнитогорский металлургический комбинат (ПАО «ММК»). Они имеют сложную структуру электрических соединений и в настоящий момент проходят реконструкцию по переводу источников с шин генераторного распределительного устройства 10 кВ в блоки турбогенератор-трансформатор на шины 110 кВ связи с ЭС. Данные ЗЭС неоднократно выходили в островной режим, а разветвленная сеть с многочисленными токоограничивающими реакторами способствовала частым провалам напряжения. Поэтому исследования по совершенствованию принципов управления эксплуатационными режимами многомашинных электротехнических систем внутrizаводского электроснабжения металлургического предприятия являются практически значимыми и безусловно актуальными.

Степень проработанности проблемы

Большой вклад в развитие теории статической, динамической и результирующей устойчивости синхронных генераторов, разработку их систем автоматического регулирования возбуждения (АРВ) и частоты вращения (АРЧВ) внесли отечественные и зарубежные ученые: Жданов П.С., Веников В.А., Жуков Л.А., Гуревич Ю.Е., Калентионок Е.В., Кимбарк Э., Андерсон П., Фуад А., Рюденберг Р., Илюшин П.В., Маркович И.М., Горев А.А., Куликов А.Л., Портной М.Г., Рабинович Р.С., Паздерин А.В. и другие. Однако данные труды в основном ориентированы на синхронные генераторы крупных ЭС и не учитывают возможности их работы на специфичные энергоемкие электрические и тепловые нагрузки, сильные связи между машинами, сложную и разнородную промышленную генерацию. Не в полной мере отражены особенности возможных эксплуатационных режимов, например провалы напряжения в условиях мощной ЭС и генераторов относительно небольшой мощности, а также аварийное отделение от ЭС при наличии тепловой нагрузки, существенно ухудшающее устойчивость. Поэтому совершенствование и формирование новых принципов управления генераторами ЗЭС актуально.

Объект исследования: многомашинные электротехнические системы внутrizаводского электроснабжения металлургического предприятия, состоящие из турбогенераторов заводских электростанций как источников распределенной генерации, поставляющих электрическую и тепловую энергию, и энергоемких потребителей.

Предмет исследования: математические модели, алгоритмы, методы и методики расчета и анализа устойчивости установившихся и переходных режимов ЗЭС, а также принципы, способы и концепция управления эксплуатационными режимами систем ВЗЭС с источниками распределенной генерации.

Цель диссертационной работы: разработка научных положений и комплекса научно обоснованных технических решений, обеспечивающих повышение статической, динамической и результирующей устойчивости систем внутриводского электроснабжения металлургического предприятия при совместной эксплуатации взаимосвязанных электротехнических систем распределенной генерации и электрической и тепловой нагрузки.

Для достижения цели поставлены и решены следующие основные задачи:

1. Развитие теории управления взаимосвязанных электротехнических систем, включающих заводские генераторы и изменяющуюся электрическую и тепловую нагрузку, на основе расчета и анализа устойчивости нормальных и аварийных режимов действующей электростанции металлургического предприятия.

2. Разработка алгоритмов расчета и методик анализа статической устойчивости нормальных и островных установившихся режимов ЗЭС, питающих энергоменные цеха и ответственные тепловые потребители металлургического производства, с учетом математических моделей индивидуальных специфичных электро-приемников и характеристик комплексной нагрузки.

3. Оценка разработанных методик и алгоритмов при проведении вычислительного эксперимента в условиях действующих ЗЭС и выявление параметров АРВ, АРЧВ, электрической и тепловой нагрузки, влияющих на устойчивость.

4. Разработка математических зависимостей, принципов эквивалентирования и алгоритмов для исследования динамической и результирующей устойчивости генераторов и нагрузки ЗЭС при провалах напряжения со стороны ЭС, выходе в островной режим и последующей ресинхронизации.

5. Обоснование требований к системам АРВ и АРЧВ синхронных генераторов, обеспечивающих необходимый запас статической и динамической устойчивости в нормальных и островных режимах с учетом блоков паровая турбина - синхронный генератор, работающих на постоянство давления в паропроводе и выбора синхронных генераторов для групповой ресинхронизации.

6. Разработка способов индивидуального АРВ генератора, обеспечивающего статическую и динамическую устойчивость за счет ограничения минимальной реактивной мощности в первом случае и демпфирования колебаний благодаря использованию канала стабилизации по углу ротора во втором.

7. Разработка принципов группового регулирования возбуждения генераторов в островном режиме на основе закона индивидуального АРВ для повышения статической устойчивости узла и групповой ресинхронизации электростанции с ЭС.

8. Создание методики выбора числа и состава блоков паровая турбина - синхронный генератор, поддерживающих давление в общем коллекторе, на основе сформулированной концепции единого управления электрическим и тепловым режимом с учетом дифференциальной защиты шин и выбора ведущего агрегата с целью групповой ресинхронизации.

9. Проведение вычислительного эксперимента и внедрение разработанных ал-

горитмов, способов, принципов, методов и методик в промышленную эксплуатацию ЗЭС с оценкой технико-экономической эффективности. Разработка комплекса мероприятий по повышению эффективности управления режимами промышленных ТЭС.

Методика проведения исследований. В работе использованы базовые положения теории статической, динамической и результирующей устойчивости синхронных генераторов, теории автоматического управления, методы численного интегрирования и диакоптики. Теоретические исследования проводились с использованием аппарата передаточных функций и структурного моделирования. Решения отдельных задач получены путем математического моделирования в среде Matlab-Simulink и программном комплексе "КАТРАН", разработанном на кафедре ЭПП МГТУ им. Г.И. Носова с участием автора.

Научная новизна работы заключается в углублении и расширении теоретических представлений о совместном регулировании возбуждения и скорости турбогенераторов промышленных ТЭС, предлагает новые принципы и алгоритмы управления взаимосвязанными многомашинными электротехническими системами, раскрывает возможности повышения статической, динамической и результирующей устойчивости средствами управления ЗЭС.

В работе получены следующие основные научные результаты:

1. На основе анализа нормальных и аварийных режимов действующих ЗЭС (в том числе провалов напряжения и выходов в островной режим) выявлена взаимосвязь между развитием аварийных ситуаций и действием систем автоматического регулирования. Для повышения показателей устойчивости ЗЭС разработаны новые принципы работы систем АРВ и АРЧВ объектов распределенной генерации.

2. Разработана усовершенствованная методика построения комплексных статических характеристик нагрузки металлургического предприятия, учитывающая параметры специфических электроприемников, генераторов ЗЭС и сети, критические значения напряжения, а также защиту минимального напряжения двигателей.

3. На основе метода последовательного эквивалентирования разработаны усовершенствованные методики расчета и анализа статической устойчивости островных установившихся режимов работы ЗЭС, учитывающие параметры сети, статические характеристики генераторов и промышленной нагрузки, а также блоки паровая турбина - синхронный генератор с тепловым графиком работы на постоянство давления в коллекторе. Установлены закономерности взаимного влияния параметров систем АРВ и АРЧВ на устойчивость генераторов и электрической и тепловой нагрузки.

4. Разработаны математические зависимости и методики для анализа динамической устойчивости генераторов и нагрузки ЗЭС при провалах напряжения со стороны ЭС, выходе в островной режим и последующей ресинхронизации.

5. Предложен способ индивидуального АРВ синхронных генераторов, повышающий статическую и динамическую устойчивость ЗЭС при параллельной работе с ЭС и в островном режиме за счет коррекции напряжения уставки регулятора напряжения в соответствии с параметрами режима ЭС и использования канала стабилизации по углу ротора.

6. Обоснованы и разработаны принципы группового управления системами АРВ синхронных генераторов ЗЭС с использованием каналов стабилизации по углам роторов, повышающие устойчивость при выходе в островной режим и последующей групповой ресинхронизации.

7. Сформулирован принцип групповой ресинхронизации промышленной многомашинной ТЭС с энергосистемой на основе метода ведущего агрегата с учетом группового АРВ, особенностей ВЗЭС и режима турбогенераторов.

8. На основе предложенной концепции единого управления электрическим и тепловым режимом для сохранения устойчивости ЗЭС при выходе на раздельную работу разработана методика выбора блоков паровая турбина - синхронный генератор, работающих в нормальном режиме на постоянство давления в паропроводе.

9. Апробированы разработанные технические решения, подтвердившие технико-экономическую эффективность исследований за счет снижения ущерба от аварийных простоев и энергосбережения.

Теоретическая значимость работы. Результаты диссертационной работы являются развитием теории и методов математического моделирования ЗЭС и нагрузки ВЗЭС. Создана научно-методическая основа для совершенствования методов планирования деятельности и разработки схем ЗЭС, дальнейшего развития теории устойчивости генераторов и нагрузки, разработки более эффективных методов и алгоритмов управления эксплуатационными режимами ЗЭС в нормальных режимах работы и отделении от энергосистемы.

Практическая ценность работы состоит в том, что в результате разработки математических моделей источников и нагрузки, алгоритмов и систем управления автоматическими регуляторами синхронных генераторов созданы технические предпосылки для повышения запаса статической, динамической и результирующей устойчивости ЗЭС. Внедрение разработанных технических решений обеспечивает энерго- и ресурсосбережение за счет повышения устойчивости, возможности увеличения вырабатываемой активной мощности ЗЭС при совместной работе с энергосистемой и снижения ущерба от недоотпуска электроэнергии и простоев при выходе на раздельную работу.

1. Для технической реализации предлагаемых способов и систем управления разработаны и переданы для внедрения на ПАО «ММК»:

- методики определения комплексных статических характеристик нагрузки и анализа статической устойчивости, а также алгоритм расчета островных установившихся режимов в составе программного комплекса «КАТРАН»;

- способ индивидуального АРВ синхронных генераторов ЗЭС при параллельной и раздельной работе с ЭС большой мощности в составе патента;

- методика распределения электрической и тепловой нагрузки между блоками паровая турбина - синхронный генератор заводской электростанции для сохранения устойчивости, учитывающая групповую ресинхронизацию и действие дифференциальной защиты шин.

2. Доказано, что внедрение разработанных технических решений повышает устойчивость генераторов и нагрузки промышленных ТЭС в нормальном и островном режимах.

3. Основные технические и экономические эффекты от внедрения разработок на электростанциях ПАО «ММК»:

- повышение статической устойчивости синхронных генераторов при параллельной работе с энергосистемой большой мощности за счет прогнозирования режимов с учетом использования разработанного способа регулирования возбуждения, учитывающего напряжение энергосистемы;

- повышение статической устойчивости синхронных генераторов при автономной работе с энергосистемой, в том числе при наличии блоков паровая турбина - синхронный генератор, работающих по тепловому графику за счет разработанной методики распределения тепловых нагрузок;

- повышение результирующей устойчивости при параллельной работе с ЭС большой мощности при провалах напряжения за счет разработанного способа индивидуального АРВ с учетом канала стабилизации по углу ротора;

- снижение ущерба от простоев оборудования цехов и недоотпуска электроэнергии по причине нарушения устойчивости синхронных генераторов в результате провалов напряжениях в сети и выходе на раздельную работу.

4. В результате внедрения разработанных технических решений в промышленную эксплуатацию ЦЭС ПАО «ММК» получен суммарный экономический эффект, составляющий более 10 млн. руб./год.

5. Разработанные технические решения, преимуществом которых является высокая эффективность при простоте реализации, рекомендуются для внедрения на промышленных ТЭС, работающих по электрическому и тепловому графикам.

В целом, внедрение результатов исследований в промышленную генерацию расширяет возможности действующих и вновь создаваемых электростанций, обеспечивает повышение экономической эффективности за счет энерго- и ресурсосбережения, способствует повышению конкурентоспособности продукции отечественных металлургических предприятий.

Реализация результатов работы. Предложенные в диссертации способ, принципы, методики и алгоритмы расчета, анализа устойчивости и принятия решений по управлению режимами используются при разработке комплекса мероприятий по повышению надежности и устойчивости работы ЗЭС металлургического предприятия с энергоемкой нагрузкой, что подтверждено актами внедрения. Алгоритм расчета установившихся режимов и методика анализа устойчивости, а также способ управления АРВ использованы при получении патентов и создании программных комплексов, прошедших госрегистрацию.

Основные результаты работы отражены в выводах и рекомендациях **проектов, выполненных при поддержке Министерства образования и науки РФ:** В 2005 г. в ВНП «Развитие научного потенциала высшей школы» по проекту № 75315 «Разработка методов оперативного управления режимами электроснабжения и электропотребления крупных металлургических предприятий с целью повышения их энергоэффективности»; в 2009-2013 гг. госконтракт № 02.740.11.0755 от 12.04.2010 по теме «Создание энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления электрической энергии на металлургическом предприятии с полным технологическим циклом» в ФЦП «Научные и научно-

педагогические кадры инновационной России».

Внедрение результатов диссертационной работы в условиях действующей системы электроснабжения промышленного предприятия осуществлено в рамках следующих НИР: разработанные методика построения статических характеристик комплексной нагрузки, методика расчета режимов раздельной работы и методика анализа статической устойчивости ЗЭС внедрены в составе программного комплекса в 2006 г. в работе «Разработка программного обеспечения расчета и анализа устойчивости узла нагрузки ЦЭС-ПВЭС при выходе на раздельную работу»; алгоритм анализа результирующей устойчивости ЗЭС внедрен в составе программного комплекса в 2007 г. в работе «Разработка программного обеспечения оперативного управления режимами ТЭЦ ОАО «ММК» и в 2008 г. в работе «Исследование релейной защиты и автоматики в питающих и распределительных сетях 110-220 кВ Магнитогорского промышленного узла с целью повышения ее эффективности»; анализ динамической устойчивости и эффективности делительной автоматики с учетом резкопеременной нагрузки и первичных двигателей источников внедрен в составе программного комплекса в 2010-2011 гг. в работе "Управление эксплуатационными режимами системы электроснабжения ОАО "ММК" с учетом ввода в эксплуатацию новых производственных мощностей со специфической нагрузкой на период до 2012 г."; способ индивидуального АРВ синхронных генераторов ЗЭС и методика выбора блоков паровая турбина - синхронный генератор, работающих в нормальном режиме на поддержание постоянства давления в паропроводе, внедрены в виде патента и программного комплекса в 2020-2021 гг в работе «Повышение энергетической эффективности основного производства ЦЭС за счет применения регулируемых приводов».

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Усовершенствованная методика построения комплексных статических характеристик нагрузки ВЗЭС, учитывающая величину критического и защиту минимального напряжения двигательной нагрузки, параметры специфичных электроприемников, передающих сетей и объектов распределенной генерации.

2. Усовершенствованная методика расчета режима раздельной работы электростанции с энергосистемой, учитывающая действие систем регулирования скорости и возбуждения, регулирующий эффект промышленной нагрузки по частоте и напряжению, наличие блоков паровая турбина - синхронный генератор с тепловым графиком работы на постоянство давления в коллекторе, а также производительность механизмов собственных нужд.

3. Усовершенствованная методика анализа статической устойчивости синхронных генераторов при раздельной работе с энергосистемой, учитывающая режим работы турбины, точку подключения и регулирующий эффект нагрузки.

4. Способ АРВ генераторов ЗЭС, повышающий статическую и динамическую устойчивость при параллельной и раздельной работе с энергосистемой за счет более эффективного использования каналов стабилизации по углу ротора и коррекции напряжения уставки в соответствии с напряжением сети.

5. Принцип группового АРВ синхронных генераторов ЗЭС, обеспечивающий повышение статической и динамической устойчивости при раздельной работе с энергосистемой, заключающийся в выравнивании собственных углов роторов с

возможностью корректировки напряжения в заданной точке сети и использовании каналов стабилизации по углам роторов генераторов.

6. Принцип групповой ресинхронизации промышленной многомашинной ТЭС с энергосистемой с выбором ведущего агрегата для регулирования частоты и групповым регулированием возбуждения для коррекции напряжения.

7. Методика выбора блоков паровая турбина - синхронный генератор, работающих в нормальном режиме на постоянство давления в паропроводе, разработанная на основе сформулированной концепции взаимосвязанного распределения тепловых и электрических нагрузок для сохранения устойчивости при выходе в островной режим, учитывающая выбор генератора для групповой ресинхронизации, а также дифференциальную защиту шин.

8. Результаты исследований и промышленного внедрения разработанных способа, принципов, методик, алгоритма и концепции, подтвердивших технико-экономическую эффективность за счет снижения ущерба от аварийных простоев и энергосбережения.

Обоснованность и достоверность научных положений подтверждаются правомерностью принятых исходных положений и предпосылок, корректным применением положений теории статической и результирующей устойчивости, теории автоматического управления и методов математического моделирования, использованием реальных характеристик действующего оборудования, адекватностью расчетных и экспериментальных данных, результатами вычислительных экспериментов, переданных к внедрению на собственную электростанцию ЦЭС ПАО «ММК».

Соответствие паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы – по направлениям исследований:

- п.1 «...анализ системных свойств и связей, ... математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические преобразователи энергии ... системы ... электроснабжения» (осуществлен анализ системных свойств системы электроснабжения крупного промышленного предприятия в аварийных режимах – гл. 1, математические модели электрических нагрузок промышленного предприятия – гл. 2, разработанные математические модели генерирующего оборудования заводской электростанции с учетом систем регулирования возбуждения и скорости – гл. 5);

- п. 2. «Разработка научных основ ... эксплуатации электротехнических комплексов, систем ...» (концепция взаимосвязанного распределения тепловых и электрических нагрузок для сохранения устойчивости при выходе в островной режим – гл. 5);

- п. 3 «Разработка... алгоритмов эффективного управления» (разработка способа индивидуального управления системой регулирования возбуждения генераторов заводской электростанции – гл. 5, разработка принципа группового

управления системой регулирования возбуждения генераторов заводской электростанции – гл. 5, разработка принципа групповой ресинхронизации заводской электростанции с энергосистемой – гл. 5);

- п. 4. «Исследование … качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях...» (анализ статической устойчивости генераторов и нагрузки заводской электростанции в нормальном и островном режимах – гл. 2, 3, анализ динамической и результирующей устойчивости генераторов при провалах напряжения в сети и выходе на раздельную работу – гл. 4, 6).

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 37 международных конференциях, форумах и конгрессах, в том числе: 68, 69, 71, 77 - 82 Международных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (Магнитогорск, 2010, 2011, 2013, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024 г.), International conference on industrial engineering (Челябинск, 2015 г.), VII Международной научной конференции молодых ученых «Электротехника. Электротехнология. Энергетика» (Новосибирск, 2015 г.), International conference on mechanical engineering, automation and control systems 2015, MEACS 2015 (Томск, 2015 г.), международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы технических наук в России и за рубежом» (Новосибирск, 2016 г.), III Международной (VI всероссийской) научно-технической конференции "Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий" (Уфа, 2017 г.), Международной научно-практической конференции (Всероссийской научно-практической конференции с международным участием) «Актуальные вопросы энергетики» (Омск, 2017, 2018 г.), International youth scientific and technical conference relay protection and automation, RPA 2018, (Москва, 2018 г.), XXXIX сессии Всероссийского научного семинара по тематике "Электроснабжение" «Кибернетика энергетических систем» (Новочеркасск, 2017 г.), XLVIII, XLIX, L Международных научно-практических конференциях с элементами научной школы «Фёдоровские чтения» Москва, 2018, 2019, 2020 г.), Международной научно-практической конференции «Электротехнические комплексы и системы» (Уфа, 2018 г.), International ural conference on green energy (URALCON) (Челябинск, 2018, 2019 г., Магнитогорск, 2021, 2022 г.), XIII Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике» (Казань, 2018 г.), International scientific-practical conference on quality management and reliability of technical systems (St. Petersburg, 2019 г.), 2019 International conference on electrotechnical complexes and systems, ICOECS 2019 (Уфа, 2019 г.), International conference on industrial engineering, applications and manufacturing, ICIEAM (Sochi, 2019, 2021, 2022 г.), I, II, III Всероссийских научно-практических конференциях «Проблемы и перспективы развития электроэнергетики» (Санкт-Петербург, 2019 г.).

тики и электротехники» (Казань, 2019, 2020, 2021 г.), 25 Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика" (Москва, 2019 г.), Russian workshop on power engineering and automation of metallurgy industry: research and practice, PEAMI 2020 (Magnitogorsk, 2020 г.), Национальной научной школе-конференции "Современные достижения университетских научных школ" (Магнитогорск, 2023, 2024 г.).

Публикации. По содержанию диссертационной работы опубликовано 64 научных труда, в том числе 35 в рецензируемых изданиях, все из которых отнесены к категориям К 1, К 2, 17 в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования (Scopus) и 4 монографий. Получены 3 патента РФ на изобретения и официально зарегистрированы 5 программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 364 наименований. Работа изложена на 347 страницах основного текста, содержит 112 рисунков, 36 таблиц и 7 приложений объемом 78 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрено состояние проблемы, обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи исследования, кратко изложено содержание диссертационной работы.

Первая глава посвящена анализу и эффективности средств управления нормальными и аварийными режимами ЗЭС. Дано общая характеристика вопросов управления эксплуатационными режимами промышленных ТЭС. Выполнен анализ способов регулирования частоты и активной, а также напряжения и реактивной мощности. Исследованы особенности работы делительной автоматики при наличии распределенной генерации. Приведены особенности исследования статической, динамической и результирующей устойчивости генераторов ЗЭС.

Промышленные ТЭС имеют сложную многоуровневую структуру с рассредоточенной нагрузкой. Пример двух электростанций, работающих в параллель по шинам 10 и 110 кВ, приведен на рисунке 1. Связь с мощной ЭС осуществляется на шинах 110 кВ, к которым подключены мощные генераторы с блочной структурой в электрической части и трансформаторы связи 110/10 кВ. Особенностью сети является наличие нескольких генераторных распределительных устройств (в рассматриваемом случае 3, 6 и 10 кВ), от которых питаются потребители собственных нужд, преимущественно асинхронные и синхронные двигатели, и промышленные энергоемкие цеха, имеющие специфическую разнородную нагрузку. Для снижения токов КЗ на распределительных устройствах широко использованы линейные и секционные ректоры, с учетом трансформаторов связи существенно повышающие индуктивное сопротивление сети и удаленность нагрузки от источников. В таких условиях генераторы относительно невысокой установленной мощности 6-60 МВт работают на шины с большой мощности со стороны ЭС.

Блоки турбина - генератор одновременно питают теплофикационную нагрузку и имеют сложные поперечные связи по теплу, что требует поддержания

параметров теплового режима. Это ведет к разнообразию эксплуатационных взаимосвязанных электрических и тепловых режимов.

Изложенные особенности приводят к возникновению аварийных ситуаций, причины и последствия которых с 2003 по 2022 гг приведены на рисунках 2, 3.

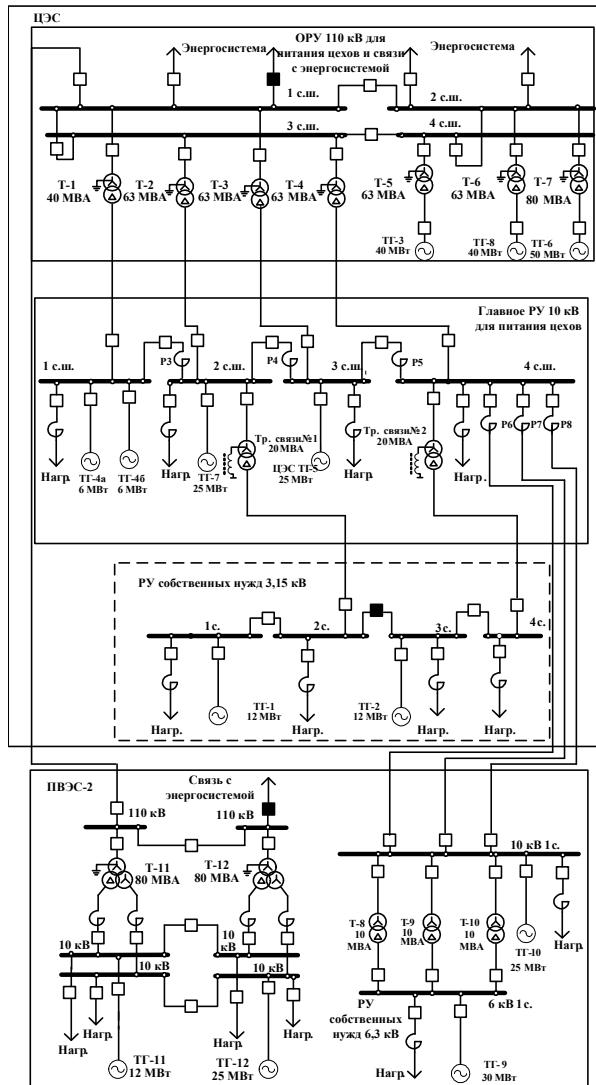


Рисунок 1 – Схема электрических соединений ЗЭС

При этом повышается вероятность нарушения при возникновении провалов напряжения со стороны ЭС. Таким образом, с целью

С целью выявления причин нарушения устойчивости проведен анализ ее показателей в нормальных и аварийных режимах ЗЭС.

Поскольку ЗЭС имеют меньшую себестоимость вырабатываемой электроэнергии, то генераторы экономически выгодно загружать под технологический максимум. Для поддержания заданного уровня напряжения существенно ограничиваются токи возбуждения и, следовательно, снижается ЭДС и устойчивость машины. В таких условиях возможности регулирования напряжения на генераторных распределительных устройствах существенно ограничены и зависят от мощной ЭС. Ситуация усугубляется тем, что при повышенном напряжении со стороны ЭС источники пытаются восстановить уровень напряжения, для чего снижаются токи возбуждения. В силу относительно невысоких установленных мощностей степень снижения ЭДС генераторов существенно превышает повышение напряжения. В результате устойчивость падает (рисунки 4, 5).

обеспечения нормируемых показателей устойчивости в установленных режимах и минимального снижения производительности необходима разработка научно-обоснованных мероприятий, направленных на совершенствование систем регулирования возбуждения и скорости, о также ограничение загрузки машин.

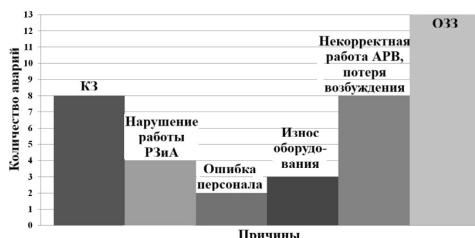


Рисунок 2 – Характерные причины аварий на ЗЭС

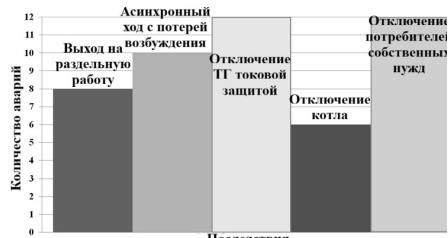


Рисунок 3 – Последствия аварий на ЗЭС

Анализ факторов, приводящих к нарушению динамической устойчивости, показал, что к наиболее тяжелым последствиям приводит выход ЗЭС в островной режим после провалов напряжения, сопровождающихся действием дифференциальной защиты шин различных напряжений. Подобное отделение, зачастую не успешное, сопровождается значительным ущербом от недоотпуска электроэнергии и простоем цехов, питающихся с шин генераторного напряжения, также нарушением теплоснабжения городских и промышленных потребителей. При неуспешном выходе в островной режим возможны аварийные простоя блоков турбина - генератор до трех суток и промышленных цехов до суток. За это время в среднем осуществляется перевод нагрузки на питание от ЭС через трансформаторы связи.

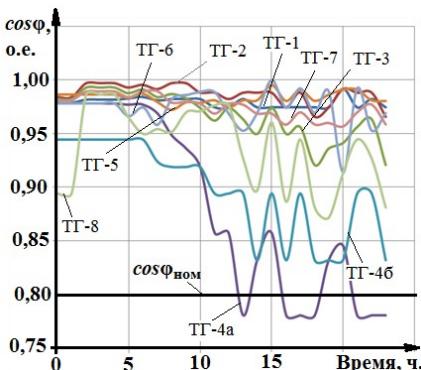


Рисунок 4 – Изменение коэффициентов мощности в течение суток

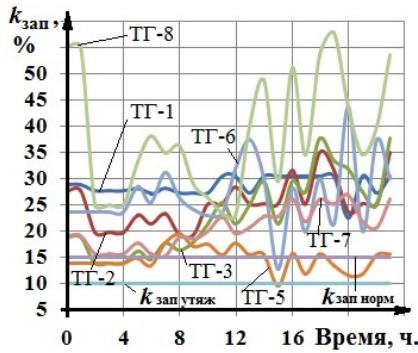


Рисунок 5 – Изменение коэффициентов запаса устойчивости в течение суток

Первой причиной неудачных выходов в островной режим является то, что при планировании режим работы дифференциальной защиты шин не рассматривается как предшествующий островному, поэтому к нему не предъявляются соответствующих требований. Анализ аварий показал, что выход ЗЭС в островной режим происходит по шинам 3 и 6 кВ с собственными нуждами и по шинам 10 и 110 кВ с промышленными цехами. Успешным в основном являлся выход собст-

венными нуждами с генераторами, работающими в конденсационном режиме.

Вторая причина неудачных отделений от ЭС - наличие тепловой нагрузки и необходимость одновременного ведения электрического и теплового режимов. Аналогично тому, как генераторы работают в параллель для обеспечения параметров электрического режима, паровые турбины работают параллельно для обеспечения теплового (попутная выработка, заданное количество тепла или поддержание давления в общем коллекторе). В нормальном режиме при одновременной выработке электрической и тепловой энергии противоречий не возникает и электрический и тепловой режим сбалансированы за счет ЭС. При отделении взаимосвязанная работа генераторов и паровых турбин претерпевает существенные изменения. Прежде всего, изменяется активная нагрузка с учетом регулирующего эффекта и динамических свойств специфичных потребителей, тепловая при этом не меняется. Вследствие резкого изменения активной нагрузки машины начинают ее компенсировать, изменяя выработку пара на нужды теплофикации. Если вышедшие в островной режим генераторы приводятся турбинами, работающими на постоянство скорости, то в электрическом режиме при отсутствии дефицита мощности параметры находятся на допустимом уровне, тогда как баланс тепловой нагрузки будет нарушаться, без влияния на электрическую. Однако, у одной из мощных турбин система регулирования может работать на поддержание давления в общем теплофикационном коллекторе. Данный блок турбина - генератор выдает активную мощность по остаточному принципу, что влияет на параметры электрического режима. В избыточных по активной мощности узлах, к которым зачастую относятся ЗЭС, блоки турбина - генератор, работающие по статическим характеристикам, сбросят мощность и пар, а недостаток пара будет пытаться скомпенсировать турбина, работающая на поддержание давления. Если выдаваемая мощность превысит допустимый предел, то генератор, как показывает практика, выпадет из синхронизма. В этом состоит взаимное влияние электрического режима на баланс теплового и наоборот, до установления нового установившегося режимов по энергии и теплу или нарушению устойчивости ЗЭС.

Третьей причиной является непрерывная реконструкция ЗЭС, построенных несколько десятилетий назад. Изменяются точки подключения и установленные мощности генераторов на различных этапах реконструкции. Мощности источников возрастают, и их переводят на работу с шин генераторного распределительного устройства в блоки генератор-трансформатор. Одновременно изменяется состав нагрузок, подключенных на шины генераторных распределительных устройств.

Четвертая причина - изменение состава генерирующего оборудования в результате наложения плановых ремонтов и аварийных отключений источников, особенно в летние месяцы. При выходе в островной режим возможно возникновение дефицита как по активной, так и по реактивной мощности в зависимости от нагрузки. Это может привести к нарушению динамической устойчивости непосредственно при отделении или статической устойчивости при длительном островном режиме. Поэтому к пятой причине можно отнести ошибочное действие систем АРВ и АРЧВ хотя бы одного генераторов. Встает необходимость анализа эффективности и совершенствования систем регулирования возбуждения и скоро-

сти промышленных турбогенераторов при параллельной и раздельной работе с ЭС с учетом одновременного ведения теплового и электрического режимов.

В случае успешного выхода на раздельную работу многомашинной системы возникает задача наискорейшего восстановления нормальной работы с ЭС, что требует разработки средств групповой ресинхронизации промышленных ТЭС.

На основе анализа устойчивости и реальных аварийных ситуаций, а также выполненных теоретических исследований *развита теория взаимосвязанных электротехнических систем* заводских синхронных генераторов и электрической и тепловой нагрузки: впервые обосновано, что для сохранения устойчивости ЗЭС при параллельной и раздельной работе необходимы следующие условия:

- взаимосвязанное регулирование активной мощности и вырабатываемой тепловой энергии во всех эксплуатационных режимах;
- проектирование и ведение режимов с учетом сохранения балансов мощностей при работе всех релейных, в том числе дифференциальных защит шин узла;
- разработка графиков ремонтов генерирующих мощностей с учетом работы дифференциальной защиты шин и отделения от энергосистемы;
- настройка систем индивидуального и группового АРВ, обеспечивающая достаточный запас устойчивости в нормальных и островных режимах;
- обеспечение групповой ресинхронизации с учетом минимизации простоев генераторов и потребителей за счет правильного действия АРВ и АРЧВ;
- обеспечение балансов активной и реактивной мощности.

Выполнение условий может быть обеспечено только при взаимосвязанном функционировании систем регулирования возбуждения и скорости, а также учете возможных эксплуатационных электрических и тепловых режимов.

Как показал анализ трудов и исследований по обсуждаемой теме, вопросы управления в большей степени разработаны для крупных ЭС и генераторов ГРЭС. Ведутся работы в области режимов малоинерционных объектов энергетики (ГТЭС и ГПЭС). Однако, вопросы сохранения тепловой нагрузки, вырабатывающей промышленными ТЭС, которые в зимний период относятся к жизнеобеспечивающим, исследованы не в полной мере.

Поскольку нарушение устойчивости генераторов наблюдалось как при совместной работе с ЭС, так и выходе в островной режим, то возник широкий круг задач, требующий решения. В частности, анализ статической, динамической и результирующей устойчивости генераторов и нагрузки ЗЭС в нормальных режимах и выходе в островной, а также совершенствование принципов действия автоматических систем регулирования турбогенераторов и их адаптация к условиям функционирования промышленных ТЭС.

Вторая глава посвящена разработке математических моделей источников и нагрузки, методик расчета установившихся режимов и анализа статической устойчивости при параллельной работе с ЭС и в островном режиме.

При комплексном анализе ЗЭС сначала оценим статическую устойчивость, как определяющую существование режима при параллельной и раздельной работе с ЭС. Для коротких сетей многомашинных промышленных систем подходит анализ коэффициента запаса по напряжению k_{3an} . ЭДС E_q генератора и критиче-

ское напряжение U_{kp} приближенно определяются по известным активной, P , реактивной Q мощностям и напряжению U на его выводах, о.е.:

$$E_q = \sqrt{\left(U + \frac{Qx_d}{U}\right)^2 + \left(\frac{Px_d}{U}\right)^2}; \quad U_{kp} = \frac{Px_d}{E_q}; \quad k_{zan} = \frac{U - U_{kp}}{U_{kp}} 100\%.$$

Как показал анализ эксплуатационных показателей исследуемой ЗЭС (рисунки 4, 5), в нормальных режимах работы объекты распределенной генерации зачастую функционируют с завышенными коэффициентами мощности $\cos\varphi$ и заниженными коэффициентами запаса статической устойчивости, которые соответствуют нормативам утяжеленных (10 %), а не нормальных (15%) режимов.

Исследование аварийных ситуаций в островном режиме выявило, что интерес представляет сочетание таких условий, как уровень напряжения $0,75 \div 0,85$ о.е. и загрузка машины $P=1$ и $Q=0$, что соответствует максимальной загрузке турбины в условиях сетей с токоограничивающими реакторами и несколькими ступенями трансформации. Форсировки не учитываются, так как в длительном островном режиме отпадают. На рисунках 6, 7 приведены k_{zan} при подключении нагрузки непосредственно к шинам генератора и через реактор сопротивлением 0,2 Ом. Наличие реакторов сети снижает максимальную мощность и k_{zan} .

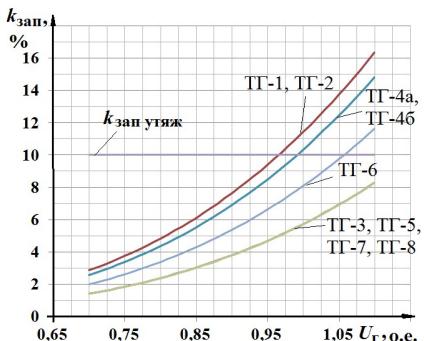


Рисунок 6 – Запас устойчивости при подключении нагрузки на шину

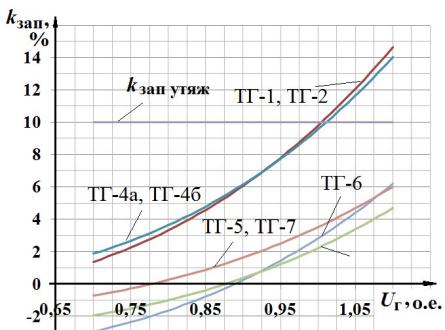


Рисунок 7 – Запас устойчивости при подключении нагрузки через реактор

Поскольку предварительный анализ статической устойчивости по напряжению при параллельной работе с ЭС и в островном режиме показал неудовлетворительные результаты, то встала задача исследования факторов, влияющих на ее показатели. Это потребовало создания математических моделей, алгоритмов расчета и методик анализа статической устойчивости в указанных условиях.

Для анализа установившихся режимов работы ЗЭС разработаны математические модели генераторов. При параллельной работе они задаются неизменными значениями активных и реактивных мощностей, при островном режиме – статическими характеристиками или активными мощностями, зависящими от тепловой нагрузки, если блок турбина – генератор работает на поддержание давления.

С целью анализа влияния потребителей металлургического предприятия на устойчивость исследован их состав и разработаны математические модели. Поскольку ЗЭС питает разнородную нагрузку, то выделены основные типы электроприемников предприятия черной металлургии и оценен их регулирующий эффект по напряжению и частоте с учетом коэффициентов $k_U = \frac{U}{U_{\text{ном}}}$, $k_f = \frac{f}{f_{\text{ном}}}$.

Мощность, потребляемая асинхронными двигателями определяется скольжением S , о.е., параметрами схемы замещения двигателя r'_2 , x_k , x_μ , о.е. и поправочным множителем, учитывающим насыщения магнитной цепи α , о.е.:

$$P = \frac{k_U^2 r'_2 s}{k_f^2 x_k^2 s^2 + (r'_2)^2}; Q = \frac{P k_f x_k s}{r'_2} + \frac{k_U^2 (1 - \alpha + \alpha \cdot k_U^2)}{k_f x_\mu}.$$

Мощность синхронных двигателей без АРВ определяется моментом сопротивления на валу M_C , о.е., номинальным коэффициентом мощности $\cos \varphi_H$, номинальной и текущей скоростями вращения ω_0 , ω , о.е.; током возбуждения с учетом частоты k_{bf} , о.е. и синхронным индуктивным сопротивлением x_d , о.е.:

$$P = k_f \omega_0 M_C; Q = \frac{\sqrt{k_{bf}^2 k_U^2 (1 + 2x_d \sin \varphi_H + x_{dp}^2) - (Px_d \cos \varphi_H)^2} - \frac{k_U^2}{k_f}}{x_d \sin \varphi_H}.$$

Такая нагрузка имеет в основном положительный регулирующий эффект. При моделировании асинхронных двигателей особое внимание уделялось учету момента сопротивления на валу и коэффициенту загрузки. Математические модели синхронных двигателей помимо этого учитывают законы АРВ.

Особое значение в настоящее время играет выпрямительная (преобразовательная) нагрузка, в которой в общем случае происходит переход от двигателей постоянного тока к частотно-регулируемым приводам переменного тока.

Регулирующий эффект двигателей постоянного тока, питающихся от нерегулируемых выпрямителей при полностью открытом вентиле зависит от конструктивной постоянной c_M , о.е., тока якоря I_a о.е. и магнитного потока Φ , о.е.:

$$P = k_U I_a \frac{k_U M_C}{c_M \Phi}, Q = 0.$$

При питании таких двигателей от регулируемых тиристорных преобразователей реактивная мощность зависит от угла открытия вентилей α , рад.:

$$P = \text{const}; \cos \alpha = \cos \varphi, \cos \varphi_U = \frac{\cos \varphi}{k_U}, Q = P \operatorname{tg} \varphi_U.$$

Поведение двигателей при отклонении параметров режима при частотном управлении определяется частотой напряжения статора $\alpha = f_1 / f_{1\text{ном}}$, его амплитудой, $\gamma = U / U_{\text{ном}}$ и моментом двигателя $\beta = f_2 / f_{1\text{ном}}$. Активная мощность

практически неизменна, а реактивная зависит от типа преобразователя.

Подобная нагрузка характеризуется в основном нулевым регулирующим эффектом активной мощности по напряжению и частоте. Потребление реактивной существенно снижается и зависит от типа выпрямителя. Большие установленные мощности подобных электроприемников снижают регулирующий эффект узла.

Рассмотрена разнородная осветительная и электротехнологическая нагрузка. Потребители электросталеплавильных цехов имеют нелинейную вольт-амперную характеристику, а также резкопеременный характер потребления мощности.

Разработана методика получения комплексных статических характеристик, учитывающая характеристики специфичных потребителей, наличие распределенной генерации в узлах нагрузки, потери в элементах сети. К ограничениям отнесены критические напряжения или уставки защиты минимального напряжения, выбранные по максимальным значениям для рассматриваемой группы потребителей.

С целью расчета установившихся режимов ВЗЭС при параллельной работе электростанции с ЭС принят модифицированный метод последовательного эквивалентирования, подходящий для многоуровневых систем сложной конфигурации. Для определения параметров установившегося островного режима разработана методика, основанная на методе последовательного эквивалентирования и позволяющая учесть статические характеристики нагрузки и регуляторов объектов распределенной генерации, а также перераспределение тепловой нагрузки в соответствии с энергетической диаграммой турбины (рисунок 8). Сходимость в режиме параллельной работы с ЭС достигается за 3 итерации, а в островном - за 8.

Разработана методика анализа статической устойчивости генераторов при параллельной работе с ЭС. В качестве параметра утяжеления принимается активная мощность с учетом корректировки выдаваемой реактивной. С целью определения действительных пределов передаваемых мощностей в островном режиме получена методика, в которой в качестве критериев утяжеления выступает активная и реактивная нагрузка, подключенная в различных точках сети. Предложено учитывать критические напряжения, причем как двигателей, так и генераторов, поскольку после срабатывания форсировок, как показывает практика, генераторы в сетях с большим числом токоограничивающих реакторов теряют устойчивость в силу длительности островного режима. Для комплексного анализа статической устойчивости многомашинной системы на основе полученного алгоритма расчета установившихся режимов разработана уточненная методика анализа статической устойчивости двигателей переменного тока ВЗЭС. Указанные методики использованы в программном комплексе «КАТРАН».

Анализ статической устойчивости газопоршневых и газотурбинных ТЭС можно осуществлять с помощью таких же подходов. Однако, поскольку последние в режиме КЗ отключаются защитой, то индуктивность сети меньше и их пропускная способность в нормальном и островном режимах существенно выше.

Третья глава посвящена анализу статической устойчивости генераторов и нагрузки действующей ЗЭС в различных эксплуатационных режимах, а также исследованию влияния систем регулирования возбуждения и скорости на нее. В качестве объекта исследования выбраны ЗЭС, представленные на рисунке 1.

Диаграмма режимов турбины ПТ-30-2.9

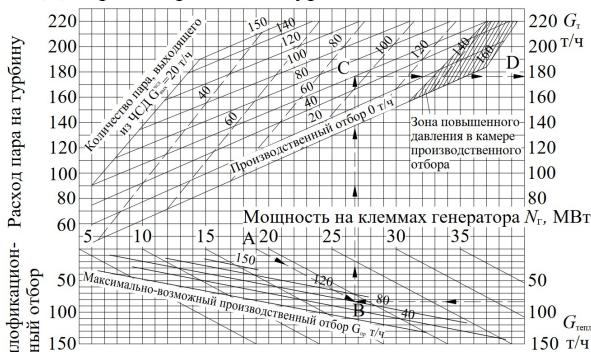


Рисунок 8 – Энергетическая диаграмма турбины Т-42/50-2,9

статические характеристики выделенных ранее индивидуальных электроприемников и их регулирующий эффект.

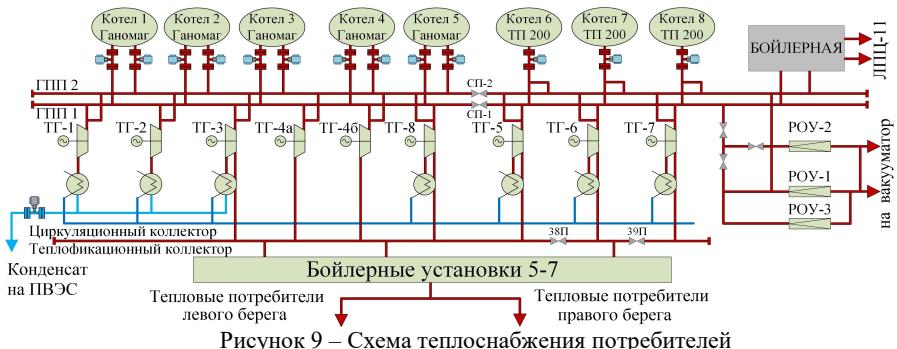


Рисунок 9 – Схема теплоснабжения потребителей

Определена доля потребителей для характерных цехов. Статические характеристики представлены в виде квадратичных зависимостей (таблица 1):

$$P_* = a_0 + a_1 U_* + a_2 U_*^2; \quad Q_* = b_0 + b_1 U_* + b_2 U_*^2,$$

где U - напряжение источника питания.

Для собственных нужд получены статические характеристики, учитывающие распределительные сети и генерацию (рисунок 10). Очевидно, наличие распределенной генерации существенно изменяет регулирующий эффект в узле нагрузки.

Для определения факторов, влияющих на устойчивость при параллельной работе с ЭС, с помощью программы «КАТРАН» проведена серия вычислительных экспериментов для электрически удаленного ТГ-9 30 МВт (рисунок 1). Исследовано влияние напряжения ЭС, закона АРВ и положения регуляторов ПБВ Т-8–Т-10. Величины коэффициентов запаса при наиболее распространенных законах АРВ и отклонений напряжения со стороны ЭС показаны на рисунке 11.

Приведены технические характеристики генераторов и турбин с отборами пара, а также дано описание их систем регулирования. Рассмотрена система теплоснабжения с поперечными связями по пару, приведенная на рисунке 9. Для определения параметров установленных режимов при параллельной и раздельной работе по полученным математическим моделям и методикам рассчитаны

Таблица 1 – Коэффициенты регрессии мощности по напряжению

Название цеха	Активная мощность			Реактивная мощность		
	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	b_2
Аглофабрика № 4	1	0	0	14,36	-24,81	11,45
Коксовый цех № 2	0,8	0,2	0	4	-8,05	5,05
Цех улавливания	0,993	0,007	0	4,64	-8,55	4,91
Доменный цех	0,969	0,031	0	-84,5	189,9	-104,4
ККЦ Конвертерное отделение	0,77	0,23	0	8,47	-15,79	8,32
ККЦ ОНРС	0,9	0,1	0	-0,667	1,673	0
ЛПЦ-10. Чистовая группа клетей	1	0	0	-0,849	1,849	0
ЛПЦ-10. Черновая группа клетей	1	0	0	10,77	-9,77	0
ЛПЦ-5. Прокатное отделение	0,883	0,117	0	16,94	-15,94	0
ЛПЦ 3. Отделение покрытий	1	0	0	0,57	-0,78	1,21
Копровый цех	1	0	0	13,76	-23,33	10,57
Цех изложниц	-0,27	1,269	0	1,49	-2,85	2,36
Фасонно-литейный цех	-0,022	1,022	0	1,63	-2,88	2,25
Кислородная станция № 5	1	0	0	-3,259	4,259	0
ПСЦ	0,989	0,011	0	5,8	-10,02	5,22
Собственные нужды ЦЭС	0,993	0,007	0	5,2	-10,4	6,2
ЛПЦ-8. Нагрузка 0,4 кВ	0,618	0,382	0	4,525	-7,752	4,227
ЦЭС. Щит 0,4 кВ	0,5	0,5	0	4,693	-9,457	5,764

Наиболее тяжелыми по устойчивости являются режимы, сопровождающиеся повышением напряжения ЭС и работой АРВ на поддержание напряжения при высокой загрузке генератора по активной мощности. Исследование влияния ПБВ (рисунок 12) показало, что рост коэффициента трансформации повышает устойчивость, так как снижает напряжение на генераторе, и АРВ находится в более благоприятных условиях. Следовательно, при перегрузке машины для плановой выработки электроэнергии необходимо учесть напряжение ЭС, закон АРВ и состояние регуляторов ПБВ и РПН.

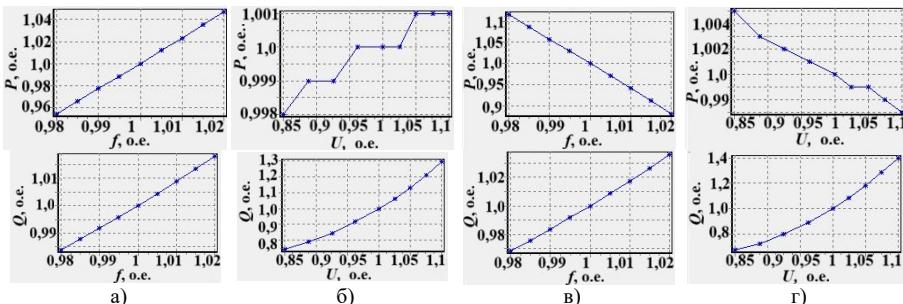


Рисунок 10 – Статические характеристики без учета (а, б) и с учетом (в, г) распределенной генерации

На примере ТГ-9 рассмотрено применение диаграмм мощности при отклонении напряжения сети. Установлено, что минимальная реактивная мощность по условиям устойчивости зависит от напряжения и при его отклонениях требует корректировки (рисунок 13). Из анализа фактической зоны работы генераторов ЗЭС (рисунок 14), видно, часть машин работает длительно в утяжеленном режиме.

На рисунках 15, 16 показаны пределы мощности ТГ-9 в нормальном и ост-

ровном режимах. Из-за реактивности во втором случае предел существенно ниже.

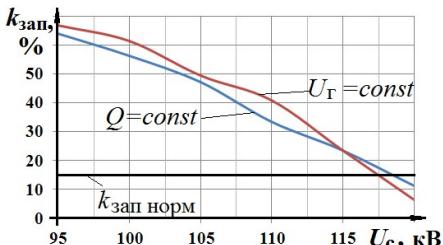


Рисунок 11 – Влияние закона АРВ на устойчивость

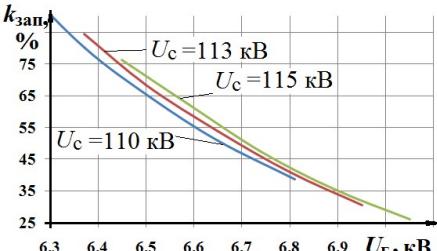


Рисунок 12 – Влияние положения ПБВ на устойчивость

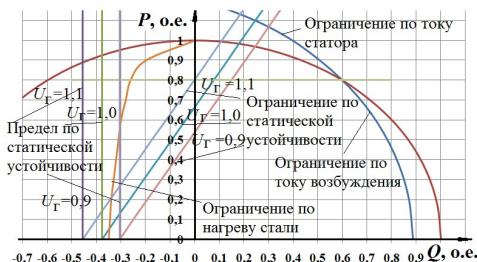


Рисунок 13 – Влияние напряжения статора на устойчивость



Рисунок 14 – Зона фактической работы генераторов ЗЭС

Анализ устойчивости в островном режиме выявил, что существенное влияние на действительный предел мощности имеют статические характеристики нагрузки и точка ее подключения, тогда как статизм систем регулирования и величины уставок, изменяемые в допустимых пределах, влияния не оказывают.

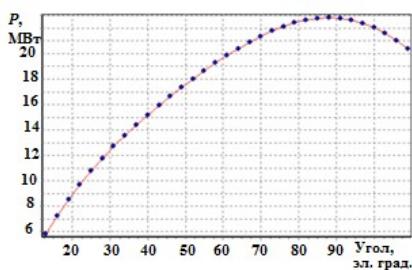


Рисунок 15 – Зависимость мощности ТГ-9 от угла при совместной работе с ЭС

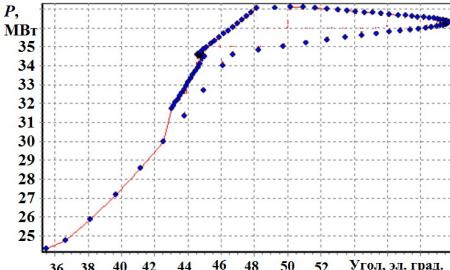


Рисунок 16 – Зависимость мощности ТГ-9 от угла при раздельной работе с ЭС

Для анализа устойчивости двигательной нагрузки проанализированы действительные коэффициенты загрузки для асинхронных двигателей собственных нужд широкого класса мощности и напряжения, которые варьируются от 0,2 до 1,1. Установлена достаточная устойчивость на выбранном объекте исследования при параллельной и раздельной работе с ЭС при номинальном напряжении. Запас устойчивости асинхронного двигателя в таких условиях приведен на рисунке 17.

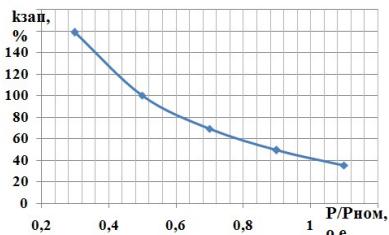


Рисунок 17 – Запас устойчивости асинхронного двигателя

может сопровождаться ее нарушением и при электрической близости к генераторам приведет к качаниям. При раздельной работе наименее устойчивы режимы дефицита активной и реактивной мощности, а также избыток активной и дефицит реактивной, поскольку рост моментов сопротивления на валу вентиляторной нагрузки сочетается со снижением напряжения и максимального момента.

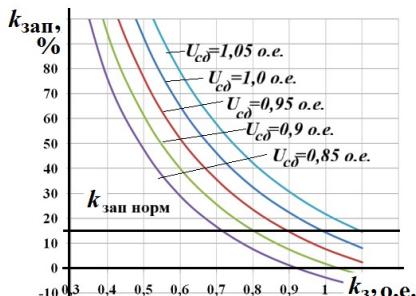


Рисунок 18 – Запас устойчивости при изменении напряжения

Анализ работы синхронного двигателя выявил случаи, когда при высокой загрузке по активной мощности и постоянстве тока возбуждения для снижения потерь машина работает при $\cos\varphi=1$. Влияние изменения напряжения на $k_{зап}$ приведено на рисунке 18, а коэффициента мощности при номинальном напряжении - на рисунке 19.

Снижение запаса устойчивости мо-

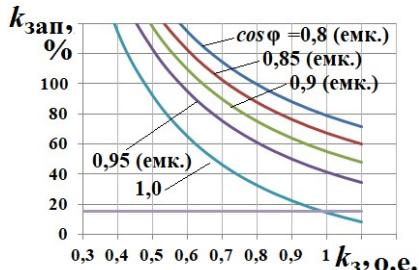


Рисунок 19 – Запас устойчивости при изменении $\cos\varphi$

В четвертой главе обоснованы принятые математические модели для расчета электромеханических переходных процессов при просадках напряжения в условиях параллельной работы с энергосистемой и выходе в островной режим.

После исследования статической устойчивости в нормальных и островных режимах встает задача анализа динамической и результирующей устойчивости при просадках напряжения и непосредственно при выходе на раздельную работу.

С этой целью приведено точное математическое моделирование генераторов и двигателей переменного тока, основанное на уравнениях Парка-Горева. В основе лежит численное решение уравнение движения ротора методом Рунге -Кутты:

$$T_J \frac{d^2\delta}{dt^2} = \Delta P_r,$$

где T_J – постоянная времени инерции агрегата генератор-турбина – определяется как $T_J = 2,74GD^2n_{ном}^2 \cdot 10^{-6} / S_{ном}$, с, GD^2 – суммарный маховой момент турбины и генератора, кг·м²; $S_{ном}$ – номинальная полная мощность, МВА; $n_{ном}$ – номинальная скорость, $об/мин$; ΔP_r – небаланс мощностей на валу, зависящий от мощности тур-

бины; действия АРЧВ; синхронной и асинхронной мощностей; потерь в обмотках ротора и статора, о.е. Моделирование реализуется в среде MATLAB и применяется для генераторов, приводимых паротурбинными установками, с целью анализа эффективности работы АРВ и АРЧВ в указанных режимах.

Отличительной особенностью математического моделирования генераторов в составе ГПЭС и ГТЭС при выходе на раздельную работу является представление малоинерционных турбин в условиях избытка или дефицита активной мощности. Поэтому предварительно рассчитывают набросы или сбросы мощности, и если они допустимы и генератор не будет отключен защитой, то продолжают расчет. Такие модели подробно приведены в работах Илюшина П.В. и Паздерина А.В. В данном труде они не рассматриваются, поскольку в заводских сетях зачастую работают только на выработку активной мощности в параллель с ЭС и не предназначены для выхода в островной режим. Это связано с энергоемкой резкоизменной нагрузкой и недопустимым небалансом мощностей при выходе, как правило, избыточных узлов промышленной генерации, на раздельную работу. При параллельной работе ограничение применения ГПЭС и ГТЭС связано с «чувствительностью» к просадкам напряжения в разветвленной заводской сети.

Поскольку в условиях многомашинной системы сложной конфигурации использование точных моделей для детальной оценки эффективности действия систем АРВ и АРЧВ занимает существенное количество времени, то сформулированы требования к эквивалентированию объектов распределенной генерации в условиях ВЗЭС. Отмечено, что необходимо учитывать электрическую удаленность, постоянные механической инерции генератора с турбиной, загрузку по активной и реактивной мощности в исходном режиме и особенности систем регулирования.

Сформулированы требования к эквивалентированию двигательной нагрузки. При расчетах электромеханических процессов в ВЗЭС нужно учитывать характер момента сопротивления на валу и нельзя использовать средневзвешенный коэффициент загрузки, так как он определяет уровень устойчивости. У синхронных двигателей также необходимо учитывать закон АРВ и реактивную мощность.

Для оценки взаимного влияния генераторов и двигателей в многомашинной системе сложной конфигурации приняты упрощенные математические модели объектов распределенной генерации, представляющие собой переходные ЭДС за переходными сопротивлениями. Асинхронные мощности учитываются при параллельной работе с ЭС относительно шин неизменного напряжения, при раздельной - взаимными асинхронными мощностями между машинами. Системы АРВ представлены изменением вынужденных ЭДС с постоянной времени возбудителя, а системы АРЧВ - изменением мощности турбины за счет действия регулятора скорости с постоянной времени сервомотора. Поскольку анализ устойчивости нагрузки осуществляется в многомашинной системе с разветвленной сетью, то для оценочных расчетов асинхронные двигатели вводились активными мощностями, корректируемыми с учетом скольжения путем решения уравнения движения ротора. Синхронные двигатели моделировались аналогично генераторам, с учетом изменения в системах регулирования возбуждения и характера момента сопротивления на валу. При параллельной работе их асинхронные моменты учи-

тывались относительно энергосистемы, при раздельной - относительно генераторов узла. Данные модели реализованы в программе «КАТРАН».

С целью анализа выхода на раздельную работу ЗЭС с нагрузкой в ряде случаев используют статические характеристики вместо динамических. Для обоснования использования статических характеристик нагрузки при выходе в островной режим проведен ряд расчетов электромеханических переходных процессов при просадках напряжения различной глубины и длительности. Вычислительный эксперимент, проводимый для асинхронного двигателя с вентиляторным моментом на валу и различной загрузкой, показал, что разница между значениями, полученными по индивидуальным и обобщенным моделям для расчета статических характеристик, зависит от коэффициента загрузки. При просадках напряжения до 15 % погрешность представления двигателей с коэффициентами загрузки до 0,7 не превышает 10 %. Поскольку таких машин более 90 %, то при выходе в островной режим сбалансированного узла можно использовать статические характеристики.

Ряд аварий, сопровождающихся просадкой напряжения при высокой загрузке генераторов по активной мощности, также приводил к выпадению отдельных машин из синхронизма при совместной работе с ЭС. Поэтому для повышения динамической устойчивости следует адаптировать существующие законы АРВ и АРЧВ к условиям ВЗЭС и разработать соответствующие мероприятия.

Генераторы ГПЭС и ГТЭС при просадках напряжения могут быть отключены защитой минимального напряжения, а при выходе на раздельную работу – защитой от недопустимого сброса нагрузки, что вызовет нарушение технологического процесса предприятия. Поэтому для питания на генераторном напряжении цеховой нагрузки они не применяются и в работе не рассмотрены.

Пятая глава посвящена разработке индивидуальных и групповых систем АРВ для повышения статической устойчивости генераторов ЗЭС, распределению функций турбогенераторов по теплу и электроэнергии, а также совершенствованию способов групповой ресинхронизации в условиях ВЗЭС.

В настоящее время для АРВ используются три основных закона: на поддержание постоянства напряжения, реактивной мощности и $\cos \phi$. Особенностью распределенной генерации является значительное влияние уровней напряжения со стороны внешней ЭС на режимы работы генераторов относительно малой мощности. При работе источника по закону постоянства напряжения при отклонении параметров режима существенно изменяется генерация реактивной мощности. При повышении напряжения со стороны ЭС генератор стремится его снизить путем снижения реактивной мощности вплоть до потребления, что опасно с точки зрения устойчивости. Снижение напряжения ЭС приведет к выработке значительной реактивной мощности, что опасно с точки зрения перегрева ротора и перегрузки статора. Принцип действия системы АРВ имеет ряд ограничений, прописанных в соответствующем блоке системы возбуждения. При вхождении в ограничения контур регулирования на постоянство напряжения размыкается, и ток возбуждения генераторов определяется диаграммой режимов. При этом регулирование напряжения отключается. Аналогичными недостатками обладают законы на постоянство реактивной мощности и коэффициента мощности. В островном режиме активные мощности изменяются в соответствии с небалансом мощностей, и

законы на постоянства реактивной мощности и коэффициента мощности не работают. В связи с изложенным, для генераторов ЗЭС ни один из классических законов не может полностью удовлетворять всем требованиям. В работах Илюшина П.В. отмечается возможность использования АРВ с переключающейся структурой при параллельной работе с ЭС и выходе в островной режим. Однако, при таком подходе необходима фиксация факта выхода, что не всегда возможно. Существующая практика регулирования напряжения вынуждает постоянно корректировать уставку напряжения с целью исключения области недовозбуждения и перевозбуждения с размыканием контура регулирования и сохранения устойчивости.

Для повышения статической устойчивости при параллельной работе с ЭС и снижения качаний роторов при провалах напряжения разработан универсальный закон АРВ, предполагающий работу генераторов по классическому закону постоянства напряжения с рядом ограничений. Первое - по среднеквадратичному току возбуждения не выше номинального для предотвращения перегрузки. Второе ограничение - по уровню напряжения на статоре, не выше $\pm 5\%$. Третье - по углу ротора или минимальному значению реактивной мощности, обеспечивающим необходимый запас статической устойчивости. Это позволяет отказаться от переключающейся структуры АРВ при выходе в островной режим. Данный способ реализован на структурно-функциональной схеме АРВ, приведенной на рисунке 20 и имеющей в своем составе мощную ЭС высокого напряжения 1, к которой через повышающий трансформатор 2, шину распределительного устройства 3 и датчики тока статорных обмоток 4 подключен генератор 5. Обмотка возбуждения 6 подключена к выходу тиристорного преобразователя 8. Датчики тока обмоток статора 4 и возбуждения 7, а также датчик напряжения 10 подключены к блоку управления 9. К шинам 3 подключены собственные нужды 11. Также приведены: блоки вычитания 12, 14, 16, 24 регуляторы тока возбуждения 13, реактивной мощности 15 и выходного напряжения 17, блок заданий уставок и ограничений 18.

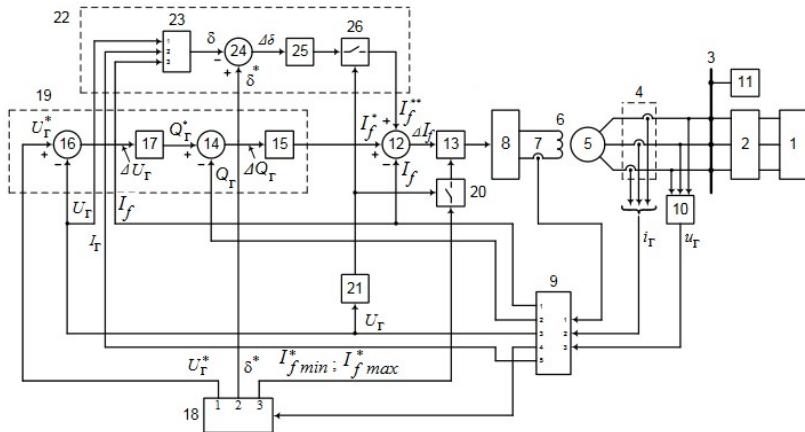


Рисунок 20 – Структурно-функциональная схема управления возбуждением

Устройство снабжено управляемыми ключами 20, 26, пороговым элементом 21, каналом регулирования возбуждения 22, содержащим блок вычисления угла

нагрузки 23 и регулятор демпфирования колебаний ротора 25. Ключ 20 обеспечивает расширение ограничений по току возбуждения, что повышает устойчивость работы при больших возмущениях, включая и КЗ. Пороговый элемент позволяет обнаружить провал выходного напряжения генераторов более чем на 15%. После достижения напряжением допустимых значений восстанавливается первоначальная структура управления. Блок 23 позволяет вычислять угол ротора в статических и в динамических режимах (рисунок 21). Для улучшения демпфирующих свойств генератора принят канал стабилизации по ускорению перемещения ротора относительно поля статора. Способ защищен патентами на изобретение.

Для повышения эффективности управления аварийным выходом в островной режим и последующей ресинхронизацией промышленной ТЭС с ЭС разработан принцип группового АРВ, в основу которого положено выравнивание углов роторов генераторов с учетом поддержания заданного напряжения. Это обеспечивает равные условия устойчивости для параллельно работающих источников. На функциональной схеме (рисунок 22) введены обозначения: 1 - ЭС, 2- генераторы, 3, 4 - трансформатор напряжения и тока, 5 - блок ограничений, 6 - обмотка возбуждения, 7 - датчик тока возбуждения, 8 - возбудитель, 9 - блок управления, 10 - система АРВ. Введен новый контур группового регулирования, в котором определяется средний угол ротора генераторов, и углы всех участвующих машин за счет АРВ стремятся к нему. Дополнительной коррекцией может поддерживаться заданное напряжение в точке ресинхронизации с ЭС. Изложенный принцип основан на сочетании результатов проведенных исследований и адаптирован к условиям функционирования ЗЭС сложной конфигурации. Учтена необходимость быстрой взаимной ресинхронизации генераторов, а также обеспечения статической устойчивости в установленвшемся островном режиме. Эффективным является определение приращений собственных углов роторов относительно выбранной точки сети.

Отдельным фактором, влияющим на статическую устойчивость генераторов, является работа АРЧВ. Существующие труды не в полной мере отражают условия, которые необходимо учесть для повышения устойчивости ЗЭС, выдающей электроэнергию и тепло, при выходе на автономную от ЭС работу. Обычно несколько блоков паровая турбина - синхронный генератор промышленных ТЭС, имеющих поперечные связи по пару и электроэнергии, работают как на тепловую, так и на электрическую нагрузку. Каждый турбогенератор работает либо только по тепловому, либо по электрическому графику. У машин, работающих по тепловому графику, регуляторы скорости турбин могут быть переключены на поддержание давления в общем паропроводе или работать на постоянство выдаваемого количества пара. В первом случае режим будет наиболее тяжелым, поскольку система регулирования не связана с электрическими параметрами сети. Поэтому при выходе в островной режим создается ситуация, в которой некоторые блоки турбина - генератор не участвуют в регулировании уровня частоты и не работают по статическим характеристикам, а выдают определенное количество пара для поддержания давления, что в случае избытка активной мощности в узле не позволяет им разгрузиться.

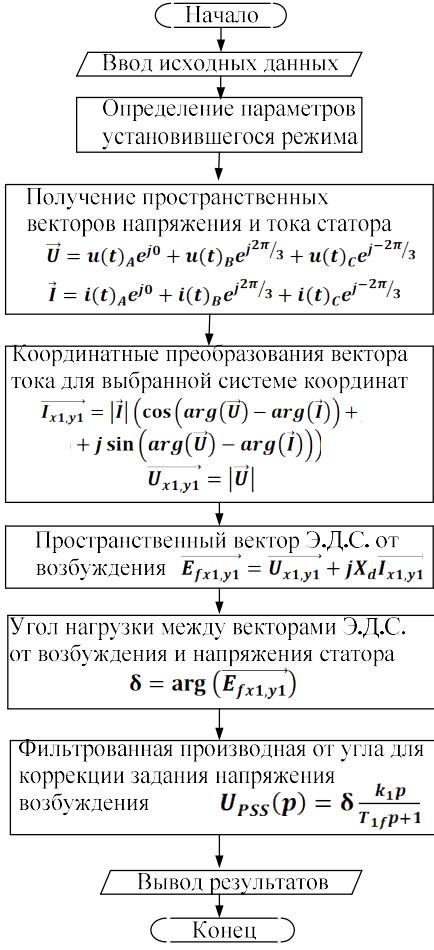


Рисунок 21 – Алгоритм расчета угла ротора

Таким образом, при выходе в островной режим необходимо обеспечить согласованную работу данных машин и сохранить тепловую нагрузку. На рисунке 23 приведена математическая модель турбины, учитывающая такой режим путем изменения коэффициентов усиления. Разработана методика выбора турбогенераторов, работающих на поддержание давления, предусматривающая определение коэффициентов запаса статической устойчивости при раздельной работе. Первоначально определяются активные мощности генераторов $P_{ЭЛ.ИС}$ в нормальном режиме и соответствующая им тепловая нагрузка $P_{Т.ИС}$. Производится расчет островного режима, определяется первоначальная электрическая нагрузка $P_{ЭЛО.С}$, тепловая на первой итерации не меняется $P_{Т.О2} = P_{Т.ИС}$.

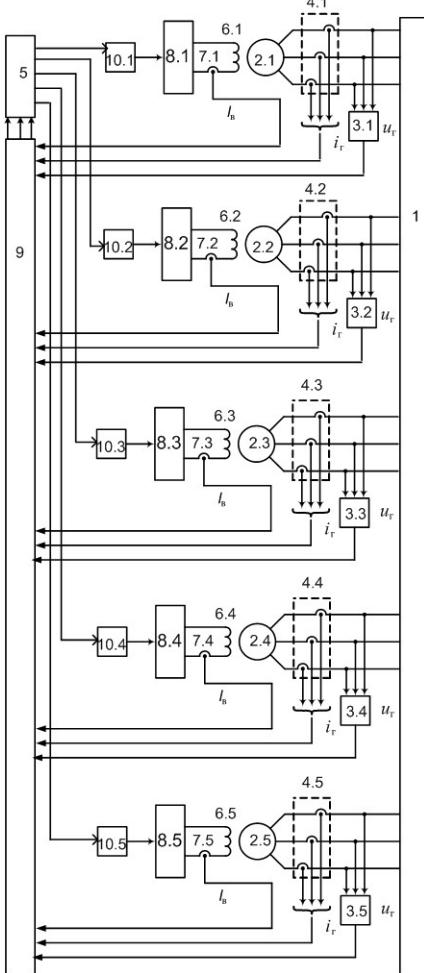


Рисунок 22 – Функциональная схема группой САРВ

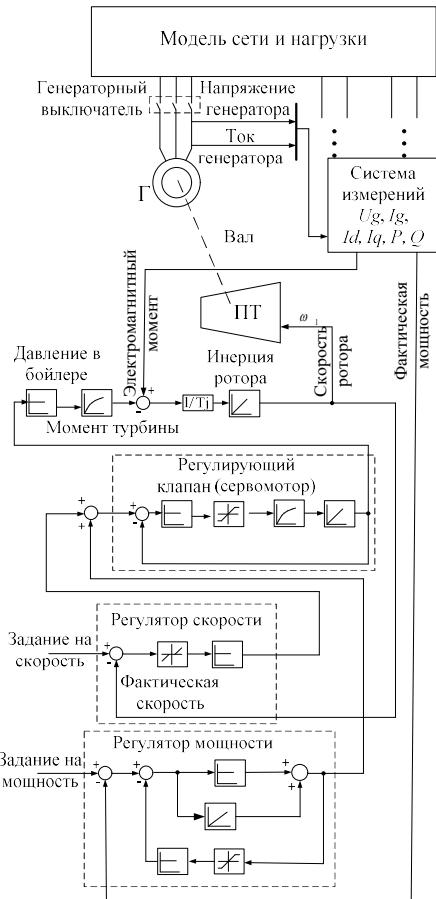


Рисунок 23 – Структурная схема АРЧВ

группового АРВ, обеспечивающим одинаковые углы и уровень напряжения. Поддержание частоты осуществляется методом ведущего агрегата, который выбирается в результате предварительных расчетов по возможности регулирования частоты в узле путем изменения мощности его турбины. Полученные принципы индивидуального и группового АРВ могут быть применены для генераторов в составе газопоршневых и газотурбинных электростанций с учетом ограничений по броскам напряжения и активной мощности. Ведение теплового режима на таких ТЭС отличается отсутствием обратной от котлов-utiлизаторов к газопоршневым двигателям и газовым турбинам, поэтому в условиях меньших реактивных сопротивлений сети подход не актуален по сохранению статической устойчивости в автономном режиме, но полезен для сохранения тепловой нагрузки.

В шестой главе с учетом разработанных принципов регулирования проведен вычислительный эксперимент по анализу переходных процессов при наиболее

небаланс между электрической и тепловой нагрузкой составит $\Delta P_{неб} = P_{Т.ОΣ} - P_{ЭЛ.ОΣ}$. Если он отрицательный, то машина-регулятор давления будет разгружаться, если положительный, то повышать выдачу пара и, следовательно, активной мощности в сеть. Расчет можно вести в несколько шагов и на каждом i -том шаге корректировать тепловую нагрузку данной машины P_{Ti} , а также электрическую оставшихся P_{Ni} . При достижении установленного режима сравнивают мощность турбины-регулятора давления с максимальной мощностью генератора в рассматриваемых условиях. Если запас не достаточный, то необходимо перераспределить функции поддержания постоянства давления пара между двумя блоками и произвести пересчет. Преимущество имеют источники, работающие по схеме блок генератор-трансформатор, поскольку они зачастую остаются в параллельной работе с питающей ЭС, а если отделяются на автономную работу, то обеспечивают избыток мощности.

Групповая ресинхронизация основана на изложенном принципе

тяжелых и сопровождающихся наибольшим ущербом авариях, связанных с просадками напряжения со стороны мощной ЭС и выходом на раздельную работу.

В программе MATLAB (рисунок 24) проведены расчеты по анализу эффективности разработанного способа индивидуального АРВ при просадках напряжения различной глубины и длительности применительно к ЗЭС (рисунок 1).

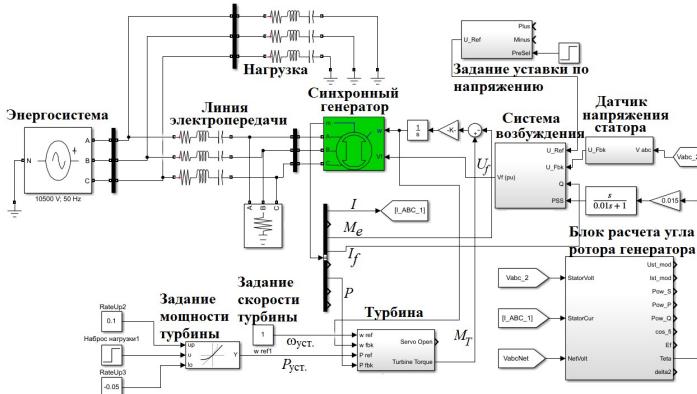


Рисунок 24 – Модель турбогенератора в программе «MATLAB»

С целью верификации разработанных программ расчета переходных процессов смоделирована аварийная ситуация выхода в островной режим, сопровождающаяся потерей устойчивости за счет работы одной

из машин на поддержание давления в тепловом коллекторе. Результаты расчета в программе «КАТРАН» подтвердили адекватность с реальными данными при погрешности до 5-10%. Аналогичный расчет проведен в программе MATLAB (рисунки 25, 26). Смоделирован выход в островной режим, в течение которого регулятор давления «передавил» регулятор скорости. Расчеты подтвердили потерю устойчивости после работы форсировок.

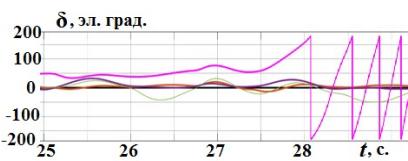


Рисунок 25 – Взаимные углы роторов

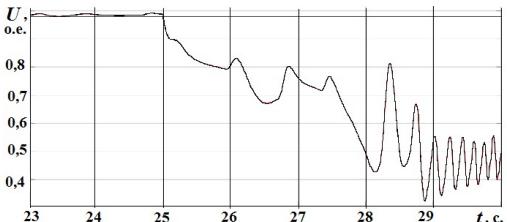


Рисунок 26 – Напряжение на генераторе

При эквивалентировании для исследуемых ЗЭС по принципам, представленным в главе 4, получено пять эквивалентных машин, работающих совместно с ЭС.

Динамические показатели генераторов оценивались при провале напряжения 0,8 о.е. и длительности 0,3 с со стороны ЭС. Корректировка напряжения уставки осуществлялась в соответствии с изменением напряжения сети и скоростью изменения угла ротора. На рисунке 27 приведено изменение углов без использования каналов стабилизации и с их применением. Качания возникают относительно наиболее удаленного ТГ-9. Максимальный заброс угла изменяется несущественно, а качания генераторов с каналами стабилизации затухают быстрее на 3 с.

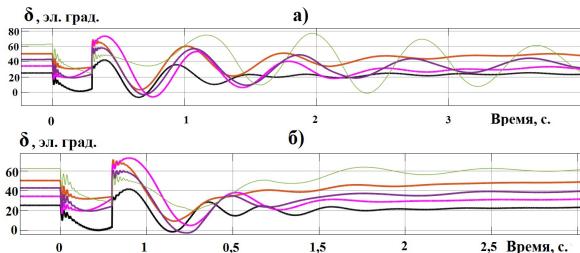


Рисунок 27 – Работа без каналов (а) и с каналами стабилизации(б)

устойчивость и облегчает групповую ресинхронизацию. Без группового АРВ углы достигают 40 эл. град., качания делятся 4 с., при наличии не превышают 30 эл. град. и 3 с.

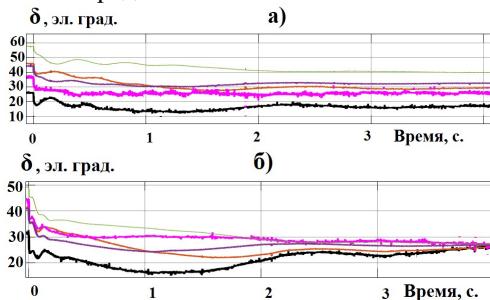


Рисунок 28 – Выход на раздельную работу с индивидуальным (а) и с групповым АРВ и каналами стабилизации (б)

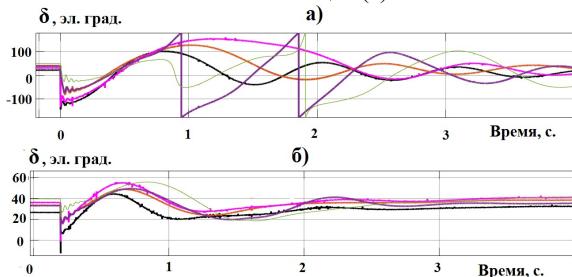


Рисунок 29 – Ресинхронизация с индивидуальным (а) с групповым АРВ и каналами стабилизации (б)

активных и реактивных мощностей показал достаточную устойчивость нагрузки. Реализация разработанных принципов АРВ на действующей ЗЭС предполагает подведение сигналов с ПЛК к существующим каналам управления (рисунок 30).

По предложенной методике рассчитан запас устойчивости при перераспределении блоков турбина-генератор, работающих по тепловому и электрическому графику (рисунок 31, 32) в зависимости от электрической $P_{наг}$ и тепловой Q_n на-

С учетом разработанного принципа группового АРВ определены параметры выхода с нагрузкой в островной режим ЗЭС (рисунок 28), который происходит с сохранением устойчивости. Групповое АРВ на постоянство углов роторов с использованием каналов стабилизации повышает

Исследованы режимы ресинхронизации многомашинной системы с ЭС (рисунок 29). Наличие каналов стабилизации и групповое АРВ сглаживает взаимные качания роторов. Без группового АРВ две машины провернулись относительно ЭС и качания составляли 4 с., а при наличии качания делятся 2 с. без проворота.

Оценка эффективности разработанных мероприятий по повышению динамической и результирующей устойчивости выявила, что длительность переходных процессов в послеаварийных режимах снижается более чем на 38 %, а предельное время отключения КЗ возрастает до 40 %.

Анализ режима выхода на раздельную работу ЗЭС при различных балансах

грузок. Перераспределение функций поддержания давления между ТГ-5 и ТГ-7 повышает устойчивость, но наилучший эффект дает их перенос на ТГ-6.

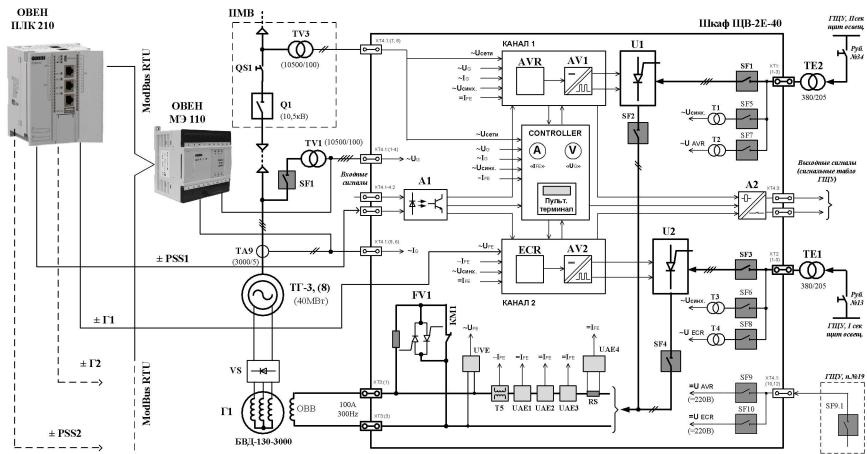


Рисунок 30 – Общая схема подключения группового САРВ

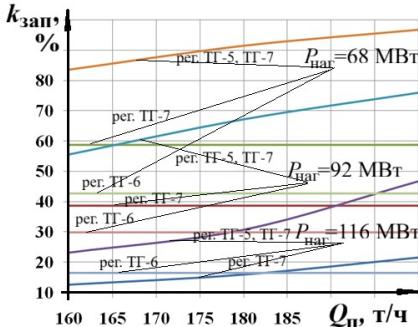


Рисунок 31 – Устойчивость ТГ-9
(конденсационный режим работы)

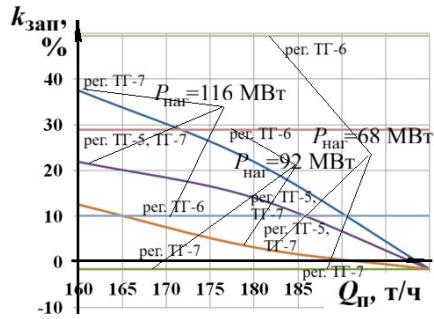


Рисунок 32 – Устойчивость ТГ-7
(работа по тепловому графику)

Оценка эффективности разработанных мероприятий по обеспечению статической устойчивости показала, что запас устойчивости в нормальном и островном режиме повысился на 5% и более, что обеспечивает нормативные значения.

По результатам работы на ЦЭС для сохранения устойчивости при выходе в островной режим скорректирована конфигурация сети за счет перераспределения точек присоединения трансформаторов 110/10 кВ к шинам 110 кВ. Функции регулирования давления перенесены на турбогенераторы ТГ-6, ТГ-8, работающие в блоках с трансформаторами на шины 110 кВ, скорректированы уставки АРВ.

Суммарный экономический эффект, составляющий более 10 млн. руб./год, обусловлен снижением мощности потребителей собственных нужд (788 тыс.руб./год), потерь в заводской сети за счет регулирующего эффекта нагрузки (897 тыс.руб./год), ущерба от недоотпуска электроэнергии (1379 тыс. руб./год) и от простоя цехов при нарушении устойчивости ЗЭС (8001 тыс. руб./год).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа устойчивости нормальных режимов, реальных аварийных ситуаций и выполненных теоретических исследований *развита теория взаимосвязанных электротехнических систем* в составе заводских синхронных генераторов, электрической и тепловой нагрузки. Разработаны требования к системам АРВ и АРЧВ, обеспечивающие необходимый запас статической и динамической устойчивости в нормальных режимах и при выходе на раздельную работу.

2. Для оценки допустимости нормальных и аварийных режимов работы ЗЭС проведен анализ устойчивости промышленной нагрузки. Разработаны математические модели индивидуальных потребителей и комплексной нагрузки, реализованные в программе «КАТРАН» и учитывающие параметры сети ВЗЭС, а также распределенную генерацию.

3. Разработаны методики определения параметров и анализа статической устойчивости ЗЭС в нормальных и островных режимах. На их основе установлены закономерности, уточняющие представления о взаимном влиянии параметров систем АРВ и АРЧВ на устойчивость генераторов и нагрузки.

4. Предложены математические зависимости и методики вычисления для исследования динамической и результирующей устойчивости генераторов и нагрузки ЗЭС при провалах напряжения со стороны энергосистемы, выходе на раздельную работу и последующей ресинхронизации.

5. Впервые предложен и апробирован способ индивидуального АРВ генератора, обеспечивающий статическую устойчивость за счет ограничения минимальной реактивной мощности с учетом изменения напряжения со стороны энергосистемы большой мощности, а также демпфирование колебаний машин при провалах напряжения за счет использования канала стабилизации по углу ротора.

6. На основе полученного способа индивидуального регулирования возбуждения синхронных генераторов разработан принцип группового АРВ при раздельной работе, позволяющий повысить статическую устойчивость и упростить групповую ресинхронизацию путем изменения углов роторов и уровня напряжения.

7. Разработан принцип групповой ресинхронизации ЗЭС с энергосистемой, использующий групповое АРВ генераторов для выравнивания углов роторов и напряжения в точке связи с ЭС и метод ведущего агрегата для равенства частот.

8. На основе предложенной концепции единого управления электрическим и тепловым режимом с целью сохранения нагрузок при выходе на раздельную работу получена методика выбора блоков паровая турбина - синхронный генератор, работающих на постоянство давления в паропроводе, учитывающая дифференциальную защиту шин и выбор ведущего агрегата для групповой ресинхронизации.

9. Разработанные способ, принципы, методики и алгоритмы внедрены в промышленную эксплуатацию ЦЭС ПАО «ММК». Суммарный экономический эффект определяется снижением мощности потребителей собственных нужд и потерь электроэнергии в распределительной сети ЦЭС, уменьшением времени простоев генераторов и цехов и составляет более 10 млн. руб./год.

11. Полученные технические решения рекомендуются для расширенного промышленного внедрения на ЗЭС с электрической и тепловой нагрузкой.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Заславец, Б.И. Представление машин переменного тока в расчетах динамической устойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями / Б.И. Заславец, В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, **О.В. Буланова**, Ю.Н. Ротанова// Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2008. – № 11(111). – С. 3-8.
2. Игуменцев, В.А. Модифицированный метод последовательного эквивалентирования для расчета режимов сложных систем электроснабжения / В.А. Игуменцев, Б.И. Заславец, А.В. Малафеев, **О.В. Буланова**, Ю.Н. Ротанова // Промышленная энергетика. – 2008. – № 6. – С. 16-22.
3. Буланова, О.В. Прогнозирование переходных режимов собственных электростанций промышленных предприятий при выходе на раздельную работу с учетом производительности механизмов собственных нужд / **О.В. Буланова** // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2009. – № 1. – С. 72-75.
4. Игуменцев, В.А. Оценка действия релейных защит в системах электроснабжения с местными электростанциями по условиям селективности и сохранения устойчивости / В.А. Игуменцев, Н.А. Николаев, А.В. Малафеев, **О.В. Буланова** // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2009. – № 1. – С. 66-71.
5. Заславец, Б.И. Анализ переходных процессов в системах электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями в режимах выхода на раздельную работу после короткого замыкания / Б.И. Заславец, В.А. Игуменцев, Н.А. Николаев, А.В. Малафеев, **О.В. Буланова**, Ю.Н. Ротанова // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2009. – № 1. – С. 60-65.
6. Буланова, О.В. Анализ переходных режимов систем электроснабжения промышленных предприятий, имеющих в своем составе объекты малой энергетики / **О.В. Буланова**, А.В. Малафеев, Ю.Н. Ротанова, В.М. Тарасов // Промышленная энергетика. – 2010. – № 4. – С. 22-28.
7. Малафеев, А.В. Анализ режимов несимметричных коротких замыканий в сложных системах электроснабжения с собственными электростанциями / А.В. Малафеев, **О.В. Буланова**, Е.А. Панова, М.В. Григорьева // Промышленная энергетика. – 2010. – № 3. – С. 26-31.
8. Малафеев, А.В. Оценка статической устойчивости генераторов заводских электростанций при параллельной и раздельной с энергосистемой работе / А.В. Малафеев, **О.В. Буланова** // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2010. – № 9-10. – С. 81-91.
9. Николаев, Н.А. Оценка регулирующего эффекта выпрямительной нагрузки для определения параметров установившихся режимов систем электроснабжения промышленных предприятий / Н.А. Николаев, **О.В. Буланова**, А.В. Малафеев, Ю.Н. Кондрашова, В.М. Тарасов// Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2011. – № 4. – С. 115-118.
10. Газизова, О.В. Исследование эффективности работы делительной автома-

тики в системе электроснабжения промышленного предприятия черной металлургии / **О.В. Газизова**, А.В. Малафеев, В.М. Тарасов, М. А. Извольский // Промышленная энергетика. – 2012. – № 10. – С. 12-17.

11. Бунин, А.А. Анализ статической устойчивости и энергопотребления синхронных двигателей при их подключении к преобразователям частоты с изменением технологических и электрических параметров режима работы / А.А. Бунин, **О.В. Газизова**, В.М. Тарасов // Электротехнические системы и комплексы. – 2016. – № 4(33). – С. 49-60.

12. Газизова, О.В. Повышение эффективности управления режимами электростанций промышленного энергоузла за счет прогнозирования статической и динамической устойчивости при изменении конфигурации сети / **О.В. Газизова**, Ю.Н. Кондрашова, А.В. Малафеев // Электротехнические системы и комплексы. – 2016. – № 3(32). – С. 27-38.

13. Газизова, О.В. Определение предельных параметров режимов для обеспечения успешной ресинхронизации объектов распределенной генерации в условиях предприятия черной металлургии / **О.В. Газизова**, А.В. Малафеев, Ю.Н. Кондрашова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 12-22.

14. Газизова, О.В. Определение границ динамической устойчивости генераторов промышленной электростанции с учетом двигательной нагрузки / **О.В. Газизова**, А.А. Алляров, Ю.Н. Кондрашова, Н.Т. Патшин // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 2(39). – С. 34-41.

15. Газизова, О.В. К вопросу учета насыщения в математической модели промышленного генератора для расчета переходных режимов в системе электроснабжения сложной конфигурации / **О.В. Газизова**, А.П. Соколов, А.В. Малафеев // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 1(38). – С. 40-47.

16. Газизова, О.В. Анализ допустимости режима потери возбуждения синхронного генератора в условиях промышленной системы электроснабжения сложной конфигурации / **О.В. Газизова**, А.П. Соколов, Н.Т. Патшин, Ю.Н. Кондрашова // Электротехнические системы и комплексы. – 2019. – № 2(43). – С. 12-18.

17. Газизова, О.В. Учет статической устойчивости синхронных генераторов в задаче планирования оптимальных режимов собственных электростанций по реактивной мощности / **О.В. Газизова**, А. В. Варганова, А. В. Малафеев, Н.Т. Патшин, А.Л. Корякин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 23-33.

18. Нигаматуллин, Р.М. Исследование влияния регулирующего эффекта нагрузки на уровень напряжения питающей подстанции с учётом мощности короткого замыкания энергосистемы / Р.М. Нигаматуллин, **О.В. Газизова**, А.В. Малафеев // Электротехнические системы и комплексы. – 2020. – № 2(47). – С. 19-25.

19. Газизова, О.В. Оценка влияния статических характеристик нагрузки на уровень частоты сети при раздельной работе с энергосистемой / **О.В. Газизова**, Р.М. Нигаматуллин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 54-63.

20. Газизова, О.В. Особенности анализа статической устойчивости генераторо-

ров промышленных электростанций при выходе на раздельную с энергосистемой работу / **О.В. Газизова** // Электротехнические системы и комплексы. – 2021. – № 3(52). – С. 29-37.

21. Газизова, О.В. Особенности применения метода последовательного утяжеления при анализе статической устойчивости источников распределенной генерации / **О. В. Газизова** // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 31-40.

22. Корнилов, Г.П. Состояние и перспективы развития систем электроснабжения металлургических предприятий с собственными электростанциями / Г.П. Корнилов, А.В. Варганова, А.Н. Шеметов, **О.В. Газизова**, Р.Р. Храмшин, Ю.Н. Кондрашова, И.Р. Абдулвелеев, А.А. Бочкарев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2021. – Т. 64, № 4-5. – С. 79-89.

23. Корнилов, Г.П. Повышение энергетической эффективности заводских электростанций металлургических предприятий / Г.П. Корнилов, **О.В. Газизова**, И.Р. Абдулвелеев , М.М. Лыгин, А.А. Бочкарев // Электротехнические системы и комплексы. – 2022. – № 2(55). – С. 55-61.

24. Корнилов, Г.П. Анализ систем возбуждения синхронных генераторов заводских электростанций / Г.П. Корнилов, **О.В. Газизова**, А.П. Соколов, Р.Р. Храмшин, Б.М. Логинов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2022. – Т. 22, № 2. – С. 69-80.

25. Газизова, О.В. Влияние режимов работы заводских ТЭЦ на статическую устойчивость турбогенераторов при отделении от энергосистемы / **О.В. Газизова** // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2022. – № 3. – С. 35-44.

26. Кондрашова, Ю.Н. Повышение эффективности противоаварийной автоматики при перспективном подключении источников распределенной генерации / Ю.Н. Кондрашова, **О.В. Газизова**, А.В. Малафеев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2022. – № 2. – С. 29-37.

27. Кондрашова, Ю.Н. Повышение устойчивости заводских электростанций при отделении от энергосистемы в результате внезапного короткого замыкания, сопровождающегося небалансом мощностей / Ю.Н. Кондрашова, **О.В. Газизова**, Е.Ф. Иванов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2022. – Т. 65, № 3. – С. 97-106.

28. Газизова, О.В. Групповое регулирование систем возбуждения заводских синхронных генераторов при выходе на раздельную работу с энергосистемой с целью повышения устойчивости / **О. В. Газизова** // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2022. – Т. 65, № 1. – С. 82-89.

29. Корнилов, Г.П. Разработка системы возбуждения автономного синхронного генератора малой мощности / Г.П. Корнилов, **О.В. Газизова**, А.А. Бочкарев, Д.М. Шарафутдинов, А.А. Мороз // Электротехнические системы и комплексы. – 2023. – № 4(61). – С. 46-52.

30. Корнилов, Г.П. Исследование системы регулирования возбуждения синхронных генераторов заводских электростанций / Г.П. Корнилов, **О.В. Газизова**, Б.М. Логинов, Р.Р. Храмшин, А.П. Соколов, А.Э. Морщакин // Известия высших

учебных заведений. Электромеханика. – 2023. – Т. 66, № 1. – С. 72-79.

31. Газизова, О. В. Оценка допустимости работы местных электростанций с резкопеременной нагрузкой / **О.В. Газизова**, Н.Т. Патшин, А.Р. Курбанов, А.О. Киров, Д.А. Дьяков // Электротехнические системы и комплексы. – 2024. – № 4(65). – С. 40-46.

32. Газизова, О.В. Разработка мероприятий по обеспечению устойчивости промышленной электростанции с резкопеременной нагрузкой / **О.В. Газизова**, А.Э. Морщакин, Д.Е. Варганов , А.О. Киров, Д.А. Дьяков // Электротехнические системы и комплексы. – 2024. – № 1(62). – С. 26-32.

33. Корнилов, Г.П. Разработка имитационной модели синхронного генератора для объектов малой и распределённой энергетики / Г.П. Корнилов, А. А. Бочкарев, **О.В. Газизова**, Д.М. Шарафутдинов, Д.А. Дьяков // Электричество. – 2024. – № 11. – С. 58-64.

34. Газизова, О.В. Применение каскадно-частотного регулирования насосов заводской ТЭЦ / **О.В. Газизова**, Г.П. Корнилов, Б.М. Логинов, М.М. Лыгин, А.А. Бочкарев // Промышленная энергетика. – 2024. – № 2. – С. 37-45.

35. Корнилов, Г.П. Повышение устойчивости генераторов заводских электростанций за счет использования каналов стабилизации / Г.П. Корнилов, **О.В. Газизова**, Б.М. Логинов, Р.Р. Храмшин, А.А. Бочкарев, Д.А. Дьяков // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2025. – Т. 68, № 2. – С. 66-75.

Публикации в материалах конференций, входящих в международные базы цитирования Scopus:

36. Kondrashova, Y.N. Increasing the Efficiency of Power Resource Management as a Solution of Issues of the Power Supply System Stability / Y.N. Kondrashova, **O.V. Gazizova**, A.V. Malapheev // International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2015). – Chelyabinsk, 2015. – P. 759-763.

37. Sokolov, A.P. Improving the accuracy mathematical modeling of transients emergency mode industrial facilities distributed generation / A.P. Sokolov, **O.V. Gazizova** // 2018 International Youth Scientific and Technical Conference Relay Protection and Automation, RPA. – Moscow, 2018. – P. 8537190.

38. Gazizova, O.V. Steady-State Stability of Industrial Distributed Generation Sources in Terms of Optimization of Their Active and Reactive Power Loading / **O.V. Gazizova**, A.V. Varganova, A.V. Malafeev // Proceedings 2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon): IEEE Xplore, 2018. – P. 187-192.

39. Sokolov, A.P. Study of the transients with the loss of field of the synchronous generator in the industrial electric power station / A.P. Sokolov, **O.V. Gazizova**, Y.N. Kondrashova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Scientific-Practical Conference on Quality Management and Reliability of Technical Systems 2019.– St. Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2019. – Vol. 666. – P. 012033.

40. Gazizova, O.V. The use of non-synchronous automatic reclosing in power plants of large industrial enterprises with a complex network configuration / **O.V. Gazizova**, A.P. Sokolov, N.T. Patshin, A.V. Malafeev, A.L. Karyakin // Proceedings -

ICOECS 2019: 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems. – Ufa: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 8949911.

41. Gazizova, O.V. Features of application of nonsynchronous automatic reclosing in industrial electric power stations / **O.V. Gazizova**, A.P. Sokolov, N.T. Patshin // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019. – Sochi, 2019. – P. 8742918.

42. Gazizova, O.V. Analysis of short circuit transients with separate operation of iron and steel industry power plant with account of dynamic characteristics of industrial load / **O.V. Gazizova**, Y.N. Kondrashova, A.P. Sokolov // Proceedings - 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019. – Chelyabinsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 7-12.

43. Gazizova, O.V. Research of the Effectiveness of Existing Laws of Automatic Regulation of Excitation of Synchronous Generators of Industrial Power Plants under Various Conditions of Connection to the Electric Power System / **O.V. Gazizova**, A.P. Sokolov // Proceedings - 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research and Practice, PEAMI 2020. – Magnitogorsk, 2020. – P. 50-55.

44. Gazizova, O.V. Overview of Existing Systems for Automatic Control of Excitation of Synchronous Generators and Their Adaptation in the Conditions of Industrial Power Plants of Metallurgical Enterprises / **O.V. Gazizova**, G.P. Kornilov, A.P. Sokolov, D. M. Mazitov // International Ural Conference on Electrical Power Engineering : Proceedings - 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering. – Magnitogorsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021. – P. 530-534.

45. Abdulveleev, I.R. Improving Energy Efficiency of Central Power Station at Industrial Facility / I.R. Abdulveleev, G.P. Kornilov, **O.V. Gazizova** // Proceedings - 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2022. – Sochi, 2022. – P. 446-450.

46. Abdulveleev, I.R. Improving Stability of TPP Load Center by Optimization of Startup Modes of Synchronous Motors / I.R. Abdulveleev, G.P. Kornilov, **O.V. Gazizova** // Proceedings - 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2022. – Sochi, 2022. – P. 440-445.

47. Gazizova, O.V. Development of a System for Regulating the Excitation of Synchronous Generators of Factory Power Plants Connected to a Powerful Energy System / **O.V. Gazizova**, G.P. Kornilov, A.P. Sokolov // International Ural Conference on Electrical Power Engineering : Proceedings - 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2022. – Magnitogorsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022. – P. 229-233.

48. Kondrashova, Y.N. Study of the Sustainability of Industrial Power Plants when Moving to Island Regime as a Result of a Sudden Short Circuit / Y.N. Kondrashova, **O.V. Gazizova**, E.F. Ivanov// 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Sochi: 2023. – P. 28-33.

49. Kornilov, G.P. Group Regulation of the Excitation of Synchronous Generators at Industrial Power Plants when Entering Autonomous Work with the Energy System / G.P. Kornilov, **O.V. Gazizova**, A.E. Morshchakin // 2023 International Conference on

Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Sochi: 2023. – P. 98-102.

50. Kornilov, G.P. The use of Microprocessor Devices for Automatic Control of the Excitation of Factory Generators / G.P. Kornilov, **O.V. Gazizova**, A.A. Bochkarev// 2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – Magnitogorsk: 2023. – P. 505-509.

51. Gazizova, O.V. Increasing the Stability of a Plant when Supplying Power to a Variable Load / **O.V. Gazizova**, A.E. Morshchakin, D.A. D'yakov // 2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM).– Sochi: 2024.– P. 196-200.

52. Gazizova, O.V. Increasing the Static Stability of Synchronous Generators with Group Excitation Control / **O.V. Gazizova**, A.E. Morshchakin, G.P. Kornilov// 2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – Magnitogorsk: 2024.– P. 817-821.

Монографии:

53. Малафеев, А.В. Статическая и динамическая устойчивость систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями: монография / А.В. Малафеев, **О.В. Булanova**, Ю.Н. Ротанова. – Магнитогорск, 2010. – 112 с.

54. Малафеев, А.В. Оптимизация режимов промышленных электростанций с учетом зависимых ограничений по условиям статической устойчивости и длительной несимметрии: монография / А.В. Малафеев, А.В. Кочкина, **О.В. Газизова**, Е.А. Панова. – Магнитогорск : Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2014. – 119 с.

55. Малафеев, А.В. Динамическая устойчивость систем электроснабжения промышленных предприятий в режимах аварийной несимметрии: монография / А. В. Малафеев, Е. А. Панова, **О.В. Газизова**. – Магнитогорск : Издательство Магнитогорского государственного технического университета, 2015. – 107 с.

56. Малафеев, А.В. Вопросы управления эксплуатационными режимами промышленных систем электроснабжения с собственными источниками электрической энергии: монография / А.В. Малафеев, А.В. Варганова, Е.А. Панова, **О.В. Газизова**. – Магнитогорск : Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2019.

Патенты РФ и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

57. **Пат. 2715731 С1 РФ, МПК H02J 3/12.** Система управления режимом напряжений в распределительной сети переменного тока / Храмшин Т.Р., Храмшин Р.Р., Корнилов Г.П., **Газизова О.В.**, Бунин А.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО "Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова". – № 2019135537; заявл. 05.11.2019; опубл. 03.03.2020. Бюл. № 7.

58. **Пат. 2767178 С1 РФ, МПК H02P 9/14, H02K 19/36.** Система регулирования возбуждения синхронного генератора в распределительной сети переменно-

го тока / Корнилов Г.П., Храмшин Р. Р., **Газизова О.В.**, Логинов Б.М.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – № 2021119042; заявл. 30.06.2021; опубл. 16.03.2022; Бюл. № 8.

59. Пат. 2802730 С1 РФ, МПК H02Р 9/14, H02K 19/36. Устройство для управления возбуждением синхронного генератора в распределительной сети переменного тока / Корнилов Г.П., Храмшин Р.Р., **Газизова О.В.**, Логинов Б.М., Соколов А.П., Бочкарев А.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО "Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова". – № 2023103251; заявл. 14.02.2023; опубл. 31.08.2023, Бюл. № 25.

60. А.с. 2012612069 РФ. Программа «Комплекс автоматизированного режимного анализа КАТРАН 6.0» / В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, **О.В. Буланова**, Ю.Н. Кондрашова, Е.А. Панова, А.В. Хламова, В.М. Тарасов, Е.Б. Ягольникова, Н.А. Николаев, В.В. Зиновьев. – № 2011618269; заявл. 07.11.2011. Оф. бюл. «Программы для ЭВМ. БД. ТИМС». – М.: ФИПС, 2012. № 2. – С 500-501.

61. А.с. 2013616847 РФ. Программа «Комплекс автоматизированного режимного анализа КАТРАН 7.0» / В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, **О.В. Газизова**, Ю.Н. Кондрашова, Е.А. Панова, А.В. Кочкина, В.В. Зиновьев. – № 2013610067; заявл. 09.01.2013; опубл. 20.09.2013, Оф. бюл. «Программы для ЭВМ. БД. ТИМС». – М.: ФИПС, 2013. № 3. – С. 488-489.

62. А.с. 2019610251 РФ. Программа «Комплекс автоматизированного режимного анализа КАТРАН 10.0» / В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, Е.А. Панова, А.В. Варганова, **О.В. Газизова**, Ю.Н. Кондрашова, В.В. Зиновьев, А.И. Юлдашева, А.А. Крубцова, Н.А. Анисимова, А.Т. Насибуллин, М.А. Тремасов, В.С. Щербакова, В.К. Богуш. – № 2018661952; заявл. 29.10.2018; опубл. 09.01.2019, Оф. бюл. «Программы для ЭВМ. БД. ТИМС». – М.: ФИПС, 2019. № 1.

63. А.с. 2022663568 РФ. Программа «Программа для имитационного моделирования системы сеть - синхронный генератор с адаптивным автоматическим регулированием возбуждения» / Г.П. Корнилов, **О.В. Газизова**, Б.М. Логинов, Р.Р. Храмшин, А.П. Соколов. – № 2022661816; заявл. 29.06.2022; опубл. 15.07.2022, Оф. бюл. «Программы для ЭВМ. БД. ТИМС». – М.: ФИПС, 2022. № 7.

64. А.с. 2025662369 РФ. Программа «Групповое регулирование синхронных генераторов заводских электростанций с учетом ограничений» / Г.П. Корнилов, А.А. Бочкарев, **О.В. Газизова**, Д.А. Дьяков, А.Э. Морщакин, Б.М. Логинов. – № 2025661648; заявл. 13.05.2025; опубл. 20.05.2025, Оф. бюл. «Программы для ЭВМ. БД. ТИМС». – М.: ФИПС, 2025. № 5.

Подписано в печать	20	Формат	Бумага тип. №1
Плоская печать	Усл. печ. л.	Тираж 100 экз.	Заказ

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38
Полиграфический участок ФГБОУ ВО «МГТУ»